74

DER PRAKTISCHE FUNKAMATEUR

Heinz Greif

Grundzüge der Meßtechnik

Der praktische Funkamateur · Band 74

Grundzüge der Meßtechnik

HEINZ GREIF

Grundzüge der Meßtechnik



DEUTSCHER MILITÄRVERLAG

Redaktionsschluß: 20. September 1967

1.—15. Tausend
Deutscher Militärverlag · Berlin 1968
Lizenz-Nr. 5
Lektor: Wolfgang Stammler
Zeichnungen: Wilhelm Kaufmann
Titelbild und Fotos: Verfasser
Typografie: Günter Hennersdorf
Vorauskorrektor: Evelyn Lemke · Korrektor: Ingeburg Zoschke
Hersteller: Werner Briege
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme, Potsdam, A 971
1,90

Inhalt

Vorwort

Die Meßtechnik spielt auf allen Gebieten der Nachrichtentechnik und der technischen Elektronik eine große Rolle. Der bekannte Satz „Messen ist Wissen" bestätigt sich täglich, sowohl in der Praxis des Amateurs als auch in der Betriebsmeß-, Steuer- und Regeltechnik (BMSR-Technik). Messen bedeutet aber nicht allein, mit einem gegebenen Gerät Meßwerte zu ermitteln. Vielmehr gehört dazu, *vor* der Messung die zweckgerechten Verfahren und Geräte auszuwählen und *nach* der Messung die gemessenen Werte zu beurteilen, um eine begründete Entscheidung fällen zu können. Mit diesem „Drum und Dran" befaßt sich das vorliegende Heft. Es soll vor allem den Überblick über verschiedenartige Meßverfahren und -geräte erleichtern. Daher sind nur in einigen Fällen Einzelheiten näher erläutert. Ausführliche Erklärungen werden besonders dort gegeben, wo es sich um weniger bekannte, jedoch praktisch wichtige Zusammenhänge handelt.

Das vorliegende Heft bildet die Grundlage für die folgende Broschüre dieser Reihe (Band 75 *Grundzüge der Steuer- und Regeltechnik*). Da der Praktiker die erworbenen Kenntnisse vor allem in der Betriebsmeßtechnik anwenden wird, sind auch einige Meßverfahren kurz erwähnt, die dem Funkamateur zunächst fernliegen.

Nicht wenige erfahrene Praktiker neigen dazu, der „Form" in der Meßtechnik geringe Bedeutung beizumessen und vor allem den „Inhalt" zu betrachten. Oft werden Darlegungen über die richtige Schreibweise von Gleichungen, über die sinnvolle Stellenzahl von Meßwerten oder sogar Untersuchungen über Meßfehler als „Formalismus" oder als „nutzlose Theorie" abgetan. Eine solche Ansicht widerspricht dem Sinn der Meßtechnik, exaktes Wissen — nicht nur ungefähre Vorstellungen — zu vermitteln. Wie der Leser beim Durcharbeiten erkennen wird, sind die dargestellten, auf den ersten Blick unwesentlich erscheinenden Zusammenhänge durchaus von

praktischem Nutzen. Auch der „praktische“ Funkamateur kommt nicht mehr ohne theoretische Grundkenntnisse aus.

Den Interessen des Leserkreises entsprechend sind neben den allgemeinen, überall anzuwendenden Grundlagen vor allem *elektrische* Meßverfahren und -geräte beschrieben. Einige andere für die moderne Betriebsmeßtechnik wesentliche Verfahren, z. B. das pneumatische Längenmeßverfahren, konnten nur kurz erwähnt werden. Auch Meßverfahren, die dem Amateur in Anbetracht des Aufwands kaum zugänglich sind (z. B. das Messen mit künstlich radioaktiven Isotopen), wurden nur am Rande aufgeführt.

Dieses Heft kann nur eine erste Einführung geben und zum tieferen Eindringen anregen.

Der Verfasser hofft, daß der vorliegende Band dem Amateur und dem Betriebspraktiker einige Anregungen geben und dadurch mithelfen wird, die Grundsätze der Meßtechnik zu verbreiten und die sinnvolle Anwendung von Meßverfahren und -geräten zu fördern.

Berlin, im September 1967

Heinz Greif

1. Grundlagen

1.1. Was heißt „messen"?

Bevor wir uns mit meßtechnischen Fragen befassen, muß zunächst einmal geklärt werden, was man unter einer Messung versteht. Diese Frage scheint einfach, doch ist eine vollständige Antwort nicht ganz leicht zu geben. Der Meßvorgang hat das Ziel, eine unbekannte Größe, die *Meßgröße*, eindeutig dem Betrage nach zu erfassen. Das geschieht, indem die Meßgröße mit einer festliegenden Größe gleicher Art verglichen wird. Die Angabe, die sich auf diese Weise ergibt, der *Meßwert*, besteht aus zwei Teilen, dem *Zahlenwert* und der *Einheit*. Um beispielsweise eine Länge zu bestimmen, verwendet man einen Maßstab, auf dem Teile der festgelegten Längeneinheit, des Meters, markiert sind, also z. B. ein Lineal mit Zentimeterteilung. Der Meßwert gibt an, wie oft das unbekannte Maß die Einheit oder einen Teil davon (wieviel hundertstel Meter) enthält.

Jede Messung erfordert also ein Meßgerät oder eine Meßeinrichtung, die „abgeglichen" ist. Die Meßeinrichtung muß indirekt mit der allgemein anerkannten Einheit verglichen worden sein, was beispielsweise beim Herstellen von Längenmaßstäben oder Skalen geschieht. Man erreicht dadurch, daß unter der Bezeichnung 1 cm oder 1 V überall das gleiche verstanden wird.

Sinnvolle Messungen sind nur möglich, wenn einige Grundsätze befolgt werden. So muß die Angabe *eindeutig* sein; beispielsweise darf die Einheit bei der Zahlenangabe nicht fehlen. Die Messung muß *reproduzierbar* sein. Das bedeutet, daß sich das benutzte Meßverfahren unter nahezu gleichartigen Bedingungen wiederholt anwenden läßt und daß die wichtigsten Umweltbedingungen (z. B. Temperatur) erfaßt und angegeben werden. Schließlich sollen alle Glieder einer Meßkette hinsichtlich des Zeitverhaltens und der Ungenauig-

keit aufeinander abgestimmt sein, damit unnötiger Aufwand an einzelnen Stellen vermieden wird. Es ist z. B. unzweckmäßig, einen teuren Präzisionsverstärker zusammen mit unpräzisen Meßfühlern zu verwenden oder kleine Zeitkonstanten eines Geräts anzustreben, das Signale von trägen Meßfühlern erhält.

Der Meßwert ist in einigen Fällen schon das endgültige Ergebnis, *das Meßergebnis*. Meist muß man mit den Einzelwerten aber noch Rechnungen — im einfachsten Falle wird der Mittelwert gebildet — ausführen, um das Meßergebnis zu gewinnen. Aus dem Ergebnis der Messungen werden oft Schlüsse abgeleitet. Der Zweck jeder Messung ist ja hauptsächlich, Vermutungen zu bestätigen oder zu widerlegen, also nicht nur Meßergebnisse zu ermitteln. Man will beispielsweise feststellen, ob sich ein Meßergebnis mit Sicherheit von einem vorher gefundenen Meßergebnis unterscheidet. Wie wir noch sehen werden, ist diese Stufe des „begründeten Schlusses" schwieriger, als es auf den ersten Blick erscheint. Die Folgerungen, die sich aus Meßwerten ableiten lassen, ohne daß man seine eigene, manchmal vorgefaßte Meinung heranzieht und damit den Schluß unsicher macht, sind in Abschnitt 4. beschrieben.

1.2. Analoges und diskretes Messen

Der Meßvorgang, also der indirekte Vergleich der unbekannten Größe mit der als Einheit festgelegten Größe, kann auf zwei Arten erfolgen: stufenlos (analog) und gestuft (diskret).

Bei einem analogen Meßverfahren wird die Meßgröße z. B. durch eine elektrische oder geometrische Größe wiedergegeben. Innerhalb der Grenzen, die durch den Meßbereich festliegen, ist jeder beliebige Zwischenwert möglich. Beispielsweise wird eine Stromstärke durch die Wegdifferenz dargestellt, die der Zeiger eines anzeigenden Meßgeräts vom Nullpunkt bis zum Meßwert auf der Skala zurücklegt. Zu jeder Stromstärke gehört eine bestimmte Skalenlänge; da die Stromstärke stufenlos geändert werden kann, ändert sich der Zeigerweg ebenfalls stufenlos. Die meisten elektrischen Geräte, z. B. Katoden-

strahloszillografen, ferner Quecksilberthermometer, Tachometer und Uhren, sind analoge Meßgeräte.
Diskrete Meßverfahren beachten nur gewisse bevorzugte Stufen der Meßgröße. Man unterscheidet zwei Arten: *binäre* und *digitale* Verfahren. Ein binäres Meßverfahren bewertet nur zwei Zustände der Meßgröße: ein gegebener Grenzwert ist beispielsweise über- oder unterschritten. Einen binären „Strommesser" stellt z. B. das Relais dar. Bis zu einer bestimmten Stromstärke bleibt es in Ruhe, und nach dem Überschreiten der Anzugsstromstärke stellt sich die andere Lage ein. Man nennt binäre Meßverfahren oft auch zweiwertige Verfahren, Ja-Nein- oder Aus-Ein-Verfahren. Als Zeichen ordnet man dem Aus-Zustand häufig eine 0, dem Ein-Zustand ein L zu.
Digitale (ziffernmäßige) Verfahren sind Meßverfahren, die die Meßgröße unmittelbar zahlenmäßig bestimmen. Dabei können aber nicht wie bei analogen Verfahren beliebige Zwischenwerte angezeigt werden, sondern die kleinste Stufe, die das Gerät unterscheidet, liegt fest. Mit einem Digitalvoltmeter lassen sich z. B. 5 mV als geringste Größenänderung erfassen. Der Meßwert kann dadurch immer nur ein ganzzahliges Vielfaches von 5 mV sein. Die Anzeige ist also 3,015 V oder 3,020 V; Zwischenwerte können nicht auftreten. Digitalmeßgeräte geben das Ergebnis direkt in Ziffern an (Bild 1) oder registrieren es ziffernmäßig (vgl. Bild 47, S. 82).



Bild 1 Digitalvoltmeter (Metra, ČSSR)

Man könnte annehmen, es sei ein Nachteil ziffernmäßiger Meßgeräte, daß sie keine Zwischenwerte angeben, sondern stets auf- oder abrunden. Tatsächlich ist das aber nicht der Fall, weil der Grundschritt fast beliebig fein gewählt werden kann, bei Digitalvoltmetern z. B. zu 5 mV, 1 mV oder auch 0,1 mV. Digitale Meßgeräte gibt es für viele analoge, also sich stufenlos ändernde Größen, wie Spannungen, Ströme, Widerstände, Frequenzen, Zeiten, Temperaturen oder Längen. Sie beruhen stets auf fortlaufender Zählung. Die Wirkungsweise ist aber kompliziert, so daß wir uns nicht weiter damit befassen wollen. Neben analogen Größen, die zur digitalen Messung im Gerät „umgesetzt" werden müssen, mißt man mit Digitalgeräten Größen, die von vornherein digital sind. So stellt die Stückzahl von Körpern oder die Anzahl von Impulsen einer Impulsfolge eine digitale Größe dar; die Grundeinheit ist ein Stück, denn halbe oder zehntel Stück können nicht vorkommen. Die Stückzahl wird ebenfalls durch Zählen (z. B. in einfachen elektromechanischen Zählern) erfaßt; eine „Analog-Digital-Umsetzung" (AD-Umsetzung) ist nicht notwendig. Die Geräte werden dadurch viel einfacher.

Digitale Meßgeräte für Größen, die sich stufenlos ändern, haben den Vorteil, daß sich der Meßfehler des Geräts außerordentlich kleinhalten läßt. Während für Zeigermeßgeräte die Meßfehler im günstigsten Fall bei 0,1% des Skalenendwerts liegen können, lassen sich mit Digitalgeräten ohne weiteres 0,01% oder sogar 0,001% erreichen. Digitale Meßgeräte eignen sich daher für Präzisionsmessungen. Ihre Verwendung setzt allerdings auch Präzisionsmeßfühler und eine sorgfältige Auswertung der Ergebnisse voraus; es wäre beispielsweise sinnlos, ein digitales Temperaturmeßgerät mit 0,01% Fehler zu benutzen, wenn der Meßfühler Alterungen im Bereich von 0,1% zeigte. Digitale Geräte lassen sich einfach ablesen und sind mechanisch sehr unempfindlich, da sie meist aus elektronischen Gruppen (also ohne bewegtes Meßwerk) aufgebaut werden. Außerdem haben sie oft sehr große Meßbereiche. Häufig ist auch die Möglichkeit der ziffernmäßigen Registrierung, auf die noch eingegangen wird, von großem Wert. Allerdings haben digitale Meßgeräte für analoge Größen (Spannun-

gen, Ströme usw.) meist einen Nachteil: Sie sind überaus teuer. Es will also überlegt sein, ob die Vorteile eines Digitalgeräts den Aufwand wirklich rechtfertigen. Oft ist es viel günstiger, durch binär wirkende Meßfühler, die nur zwei Arten von Signalen („Ein“, „Aus“) liefern, die Meßgröße gleich als Zahlenwert zu erfassen. Dadurch sind digitale Drehzahlmessungen sowie Stückzählungen mit verhältnismäßig geringem Aufwand möglich.

Als Anzeigeeinrichtung digitaler Geräte werden unter anderem *Ziffernanzeigeröhren* (Glimmlampen mit 10 als Ziffern geformten Katoden, vgl. Bild 2) sowie für niedrige Spannungen *Ziffernprojektoren* (Bild 3) benutzt, bei denen das Negativ der Ziffern oder der Zeichen vergrößert auf eine Mattscheibe abgebildet wird.

Es wurde bereits erwähnt, daß die Uhren zu den analogen Geräten gehören. Eine Ausnahme bilden die Normaluhren auf Straßen oder Bahnhöfen, die in Minutensprüngen weiterschalten. Sie zählen zu diskreten Geräten, ihr Grundschritt ist 1 min. Die meisten anderen Uhren zeigen die Zeit anscheinend stufenlos an. Die Betrachtung der Zeiger mit einer



Bild 2 Ziffern- und Zeichenanzeigeröhre

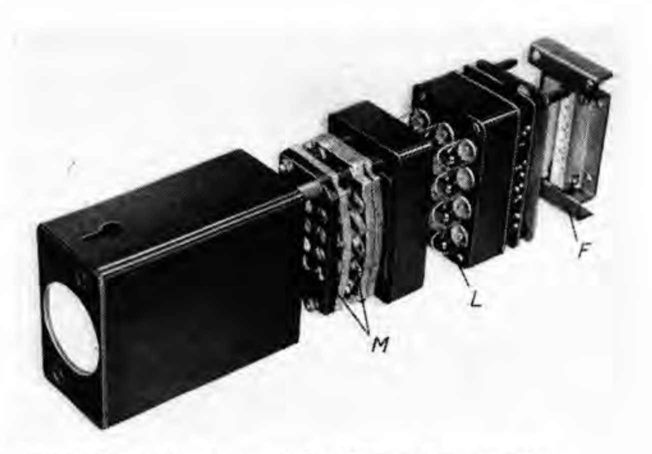


Bild 3 Ziffernprojektor, demontiert; M — Ziffernmasken und Optik, L — Glühlampen, F — Fassung

starken Lupe oder ein Blick in das Innere einer Uhr beweist allerdings, daß sich die Zeiger tatsächlich ruckweise — im Takt der Hemmeinrichtung, wie Unruhe oder Pendel — bewegen. Das Beispiel ist insofern lehrreich, als es zeigt, daß ein diskretes Meßgerät bei hinreichend feiner Stufung für den Benutzer wie ein analoges Gerät wirken kann. Gerade bei einer Uhr gehen durch die Stufung keine für den Benutzer wesentlichen Zwischenwerte verloren. Wirklich analog arbeitende Uhren sind die elektrischen Uhren, die durch einen Elektromotor angetrieben werden.
Die Begriffe analog, binär und digital findet man auch in vielen anderen Gebieten, z. B. bei der Bezeichnung der Meßfühler, bei Fernübertragungen, Steuer- und Regeleinrichtungen, Registrier- und Rechenverfahren. Eine analoge Fernübertragung erfolgt beispielsweise durch das Telefon, eine binäre Übertragung durch Telegrafie. Eine digitale Fernmeldeeinrichtung betätigt z. B. eine von zehn Meldelampen oder eine Ziffernanzeigeröhre. Man kann demnach eine Nachricht (oder einen Meßwert) sowohl analog als auch binär oder digital übertragen, nur sind der Zeitaufwand, die Kosten und die Zuver-

lässigkeit unterschiedlich. Das langwierige binäre Verfahren (Telegrafie) ist nur wenig anfällig gegen Störungen. Wir rechnen normalerweise digital, doch sind auch analoge Rechenverfahren (mit Rechenschieber oder durch grafische Darstellung) und binäre Verfahren (das bekannte Dualsystem elektronischer Rechenmaschinen mit den Zeichen 0 und L) im Gebrauch.

Tabelle 1 Meßverfahren zur Stromstärkemessung

Verfahren	Gerät	Angabe
Analoge Messung, analoge Wiedergabe	Zeigermeßgerät	Skalenstrecke, z. B. fotografisch aufgenommen
Analoge Messung, digitale Ablesung	Zeigermeßgerät mit Skalenteilung	Zahlenangabe, Zwischenwerte geschätzt
Binäre Messung	Relais	Wert größer (kleiner) als Anzugsstrom
Digitale Messung	Ziffernvoltmeter	Zahlenangabe, Zwischenwerte nicht ablesbar

In Tabelle 1 sind die Möglichkeiten, eine Stromstärke zu messen, noch einmal zusammengestellt. Es sei noch darauf hingewiesen, daß die meisten analogen Meßgeräte (Zeiger- und Lichtmarkengeräte usw.) ziffernmäßig abgelesen werden. Die Strecke, die der Zeiger auf der Skale zurückgelegt hat, kann man nicht fehlerlos bestimmen; beim Ablesen rundet man durch Schätzen der Teilstriche stets auf oder ab. In diesem Falle übernehmen wir selbst die Funktion eines Analog-Digital-Wandlers, indem wir den Zeigerweg, eine stufenlose Größe, durch Bezeichnung in Skalenteilen oder in zehntel Skalenteilen (also gestuft) wiedergeben.

1.3. Größen und Einheiten

1.3.1. Grundgrößen und dezimale Unterteilung

Wie aus dem Gesagten hervorgeht, beruht jede Messung auf einem Vergleich mit festliegenden Einheiten gleicher Art. Messen hat jedoch nur einen Sinn, wenn die verwendeten Einheiten allgemein bekannt und gebräuchlich sind. Uns erscheint das heute selbstverständlich. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt aber, daß es vor 150 Jahren allein in Deutschland z. B. Dutzende von Längenmaßen (Spanne, Elle, Fuß usw.) gab. Die gleiche Bezeichnung wurde in verschiedenen Orten für verschiedene Längen verwendet. Man kann sich leicht vorstellen, welches Durcheinander entstünde, wenn das heute ebenso wäre. Darum ist die Festlegung der Einheiten für die Meßtechnik von großer Bedeutung.
In der DDR wurden durch ein Gesetz vom 31. 5. 1967 die Grundgrößen verbindlich festgelegt. Das sind:

das Meter	(Längeneinheit);
die Sekunde	(Zeiteinheit);
das Kilogramm	(Masseeinheit);
das Ampere	(Einheit der Stromstärke);
das Grad Kelvin	(Temperatureinheit);
die Candela	(Einheit der Lichtstärke).

Diese sechs Grundgrößen reichen an sich aus, um jede beliebige Größe zu messen, jedoch hat man aus praktischen Gründen eine Reihe weiterer Einheiten abgeleitet (z. B. die Minute, das Volt, das Watt, die Kalorie). In Abschnitt 8. findet der Leser wichtige Einheiten mit ihren Kurzzeichen. Es sei darauf hingewiesen, daß die Festlegungen des genannten Gesetzes für jedermann verbindlich sind. So dürfen die veralteten Einheiten Gauß, Maxwell und Oerstedt nicht mehr benutzt werden.
Wie schon beschrieben wurde, besteht das Wesen der Messung darin, festzustellen, wie oft die Einheit in der unbekannten Größe enthalten ist. Die Einheiten sind aber oft zu groß oder zu klein. Es wäre unpraktisch, wenn man angeben wollte, daß das menschliche Auge bei einer Wellenlänge des Lichtes von

0,000 000 555 m am empfindlichsten ist. Auch eine Schreibweise wie $555 \cdot 10^{-9}$ m kann nicht befriedigen. Zur bequemeren Handhabung sind deshalb dezimale Teile und Vielfache festgelegt worden:

Vorsatz	Kurzzeichen	Wert in Einheiten	Beispiel
Pico-	p	10^{-12}	1 pF = 10^{-12} F
Nano-	n	10^{-9}	1 nm = 10^{-9} m
Mikro-	μ	10^{-6}	1 μF = 10^{-6} F
Milli-	m	10^{-3}	1 ms = 10^{-3} s
Zenti-	c	10^{-2}	1 cm = 10^{-2} m
Dezi-	d	10^{-1}	1 dt = 10^{-1} t
Deka-	da	10^{1}	(wenig gebräuchlich)
Hekto-	h	10^{2}	1 hl = 10^{2} l
Kilo-	k	10^{3}	1 kg = 10^{3} g
Mega-	M	10^{6}	1 MHz = 10^{6} Hz
Giga-	G	10^{9}	1 GW = 10^{9} W
Tera-	T	10^{12}	1 TΩ = 10^{12} Ω

In die Elektrotechnik führen sich diese Vielfachen und Teile nur langsam ein; statt 10 000 MΩ, wie noch häufig angegeben wird, schreibt man günstiger 10 GΩ, für 0,022 μF besser 22 nF. Nicht von allen Einheiten können dezimale Vielfache und Teile gebildet werden, beispielsweise nicht vom °C, vom Winkelgrad oder von der Stunde. Es sind auch nicht alle zulässigen Unterteilungen zweckmäßig. Die Bildung des Hektoohms oder des Zentiamperes ist z. B. nicht notwendig. Zusammengesetzte Einheiten sollen stets gemeinsam abgekürzt oder ausgeschrieben werden (z. B. nicht 5 kOhm, sondern kΩ).

Bei Rechnungen kann die Einheit niemals „gedacht" werden. Die Maße eines Bauteils können deshalb nicht mit 15 × 18 × 30 mm angegeben werden. Da es sich um eine Länge zur dritten Potenz, d. h. um ein Volumen handelt, sind

$15 \times 18 \times 30\ \text{mm}^3$ oder
$15\ \text{mm} \times 18\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$

richtig. Die Einheiten dürfen durch Indizes nicht verändert werden. Beispielsweise ist eine Schreibweise wie $10\ V_{ss}$ oder $10\ V_{eff}$ unzulässig. Richtig muß es dagegen heißen:

$$U_{eff} = 10\ V .$$

1.3.2. Größen- und Zahlenwertgleichungen

Gleichungen können in zwei Formen auftreten: als *Größengleichungen* und als *Zahlenwertgleichungen*. Eine *Größengleichung* ist z. B. das Ohmsche Gesetz

$$I = \frac{U}{R}$$

oder die Gleichung zur Errechnung des Gesamtwiderstands R_g mehrerer parallelgeschalteter Widerstände R_1 bis R_n

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n} .$$

Größengleichungen geben allgemeine, nicht an bestimmte Einheiten gebundene Gesetzmäßigkeiten wieder. Die Größen können in alle Einheiten eingesetzt werden, die das Gleichheitszeichen rechtfertigen. Auf beiden Seiten der Gleichung muß also (nach sinnvollem Kürzen) die gleiche Einheit stehen. Deshalb müssen in solche Gleichungen stets Zahlenwert und Einheit eingesetzt werden. Um den Gebrauch zu erleichtern, gibt man oft die Einheiten an, mit denen die Gleichung erfüllt wird; unbedingt erforderlich ist das aber nicht. Allgemein setzt man in das Ohmsche Gesetz die Einheiten V, A und Ω ein. Es lassen sich aber auch die Einheiten V, mA, kΩ oder V, μA, MΩ verwenden. Die beiden letzten Arten sind für den Amateur oft besonders günstig. Durch Einsetzen der Einheiten überzeugt man sich leicht von der Richtigkeit

Es ist:

$$1\ A = \frac{1\ V}{1\ \Omega}$$

$$10^{-3}\ A = \frac{1\ V}{10^{3}\ \Omega}$$

$$1\,\text{mA} = \frac{1\,\text{V}}{1\,\text{k}\Omega}$$

Beim Kürzen sind die Definitionen der Einheiten heranzuziehen:

$$1\,\Omega = \frac{1\,\text{V}}{1\,\text{A}} = 1\,\text{VA}^{-1}$$

$$1\,\text{Hz} = \frac{1}{1\,\text{s}} = 1\,\text{s}^{-1}$$

$$1\,\text{N}^{*)} = \frac{1\,\text{mkg}}{1\,\text{s}^2}\ \text{usw.}$$

Zahlenwertgleichungen treten seltener auf. Sie zeichnen sich dadurch aus, daß neben Zahlenwerten wie π und e, die man vereinzelt auch in Größengleichungen findet, andere Zahlenwerte enthalten sind. Oft entstehen die Zahlenwerte dadurch, daß Teile der Gleichung schon ausgerechnet wurden. Bei Zahlenwertgleichungen können die Größen nicht in beliebigen Einheiten eingesetzt werden; vielmehr sind bestimmte Einheiten (meist unter der Formel erläutert) vorgeschrieben.

Beispiele für Zahlenwertgleichungen

Berechnung der Primärwindungszahl n_1 eines Trafos aus dem Eisenquerschnitt A bei gegebener Primärspannung, Induktion und Frequenz:

$$n_1 = \frac{10^4}{A}$$

(n_1 — Primärwindungszahl, A — Eisenquerschnitt in cm^2).

Berechnung einer Netzdrossel:

$$L = \frac{3{,}18}{f}$$

(L — Induktivität in H, f — tiefste Frequenz, die gesperrt werden soll, in Hz).

*) N = Newton (Krafteinheit).

Solche Gleichungen sind an sich unexakt, weil die Einheit der Konstanten weggelassen wurde. Im zuletzt genannten Beispiel kann die Induktivität natürlich nicht ein bestimmter Teil einer Frequenz sein.

In den Gleichungen der Meßtechnik treten verschiedenartige Kurzzeichen, Formelzeichen und andere Symbole auf. An dieser Stelle soll, um Verwirrungen vorzubeugen, kurz zusammengefaßt werden, welche Bedeutung die verwendeten lateinischen und griechischen Buchstaben haben. Es bestehen sechs verschiedene Möglichkeiten:

- *Einheiten* (Grundeinheiten und abgeleitete Einheiten), z. B. C (Coulomb), p (Pond), m (Meter), s (Sekunde) usw. (vgl. Aufstellung, S. 93)
- *dezimale Vorsätze der Einheiten*, z. B. c (Zenti-), p (Pico-), m (Milli-), k (Kilo-) (vgl. S. 17)
- *Formelzeichen*, z. B. C (Kapazität), U (Spannung), L (Induktivität), N oder P (Leistung), F oder A (Fläche), T (Temperatur), t (Zeit), γ (Dichte), λ (Wellenlänge) (vgl. Aufstellung S. 90)
- *dimensionslose Zahlenwerte*, $\pi = 3{,}141592\ldots$, $e = 2{,}718281\ldots$
- *Naturkonstanten* (d. h. Zahlenwerte mit Dimensionen), z. B. e (Elementarladung) $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As, c (Vakuumlichtgeschwindigkeit) $= 3 \cdot 10^{8}$ m/s, g (Erdbeschleunigung), L (*Loschmidtsche* Zahl)
- *mathematische Zeichen*, z. B. Σ (Sigma, Summationszeichen), π (Pi, Multiplikationszeichen), Δ (Delta, Zeichen für Differenz), tan (Tangens), arc (Arcus, d. h. Bogen), lg (dekadischer Logarithmus), ln (natürlicher Logarithmus), i oder j (imaginäre Einheit) usw.

Wie man sieht, können die gleichen Buchstaben Einheiten oder dezimale Vorsätze, Formelzeichen und (dimensionslose oder benannte) Zahlenwerte bedeuten.

Formelzeichen und mathematische Zeichen sind leicht daran zu erkennen, daß sie ohne Zahlenwerte auftreten. Einheiten findet man dagegen entweder als Dimensionsangabe in Zahlenwertgleichungen oder zusammen mit Zahlen. In Texten werden Formelzeichen oft in einer anderen Schriftart (Kursivschrift)

wiedergegeben. Einheiten und dezimale Vorsätze stehen dagegen stets in der Schriftart des zugehörigen Textes. Die Formelzeichen sind nicht für alle Gebiete verbindlich festgelegt; gegebenenfalls muß man die Formelzeichen erläutern. Solche Zweifelsfälle treten häufig auf; z. B. wird die Zeit als T, t oder τ bezeichnet.
Darüber hinaus kann das gleiche Symbol auf verschiedenen Gebieten unterschiedliche Bedeutung haben, so bedeutet Φ (Phi) den magnetischen Fluß oder den Lichtstrom. Dezimale Vielfache und Teile treten nur zusammen mit Einheiten auf, und zwar stehen sie stets *vor* der Einheit. Demnach bedeuten:

1 mp 1 Millipond
1 pm 1 Picometer.

Treten Einheiten auf, die mit Vorsätzen zu verwechseln sind, so läßt man einen Zwischenraum:

1 p m 1 Pondmeter.

1.4. Gebrauchsnormale

Für praktische Messungen genügen die Festlegungen für Grundeinheiten und abgeleitete Einheiten nicht. Man braucht vielmehr Körper, deren elektrische, geometrische oder andere Eigenschaften zahlenmäßig bekannt sind. Solche Körper heißen *Normale*. Verkörperte Normale werden in den staatlichen Instituten (in der DDR im Amt für Meßwesen und Warenprüfung) aufbewahrt. Damit auch dem Meßtechniker Normale zur Verfügung stehen, vergleicht man in diesen Instituten auf Verlangen die vorhandenen Normale mit den angelieferten Körpern oder Geräten. Diese Tätigkeit heißt *eichen*. Geeichte Körper oder Geräte dienen dann als *Gebrauchsnormale* in Meßlabors usw. Mit geeichten Gebrauchsnormalen kann man seine eigenen Meßgeräte vergleichen und z. B. systematische Fehler nachweisen (vgl. S. 26). Manche Geräte sind eichpflichtig, d. h., jedes einzelne Gerät muß durch staatliche Stellen *geeicht* oder *beglaubigt* sein, z. B. Waagen und



Bild 4
Weston-Normalelement

Fieberthermometer. Längennormale sind beispielsweise die bekannten Endmaße. Ein Zeit- und Frequenznormal stellt das *Zeitzeichen* dar, das täglich mehrmals über den Rundfunk gesendet wird.



Bild 5 Normalwiderstände

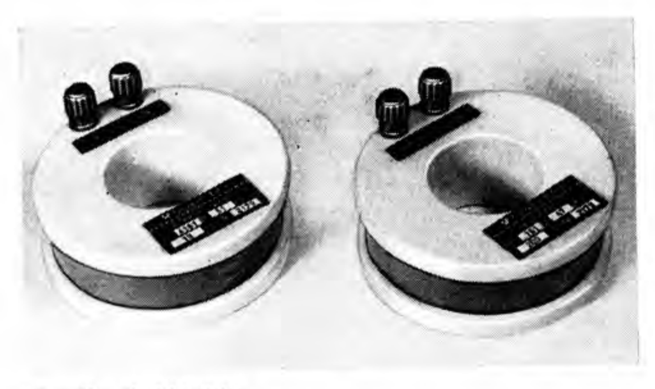


Bild 6 Normalinduktivitäten

Nicht jedes beliebige Bauteil oder Gerät läßt sich eichen; an eichfähige Objekte stellt man hohe Ansprüche. So sind keine Geräte oder Bauteile eichfähig, die zu große Abweichungen von den Soll-Werten zeigen bzw. die sich voraussichtlich im Laufe von Wochen oder Monaten erheblich verändern werden. Eichfähige Gebrauchsnormale, die zur Ausrüstung jedes größeren Meßlabors gehören, sind oft recht teuer. Der Umgang mit ihnen erfordert große Sorgfalt. Die Bilder 4 bis 7 zeigen moderne elektrische Gebrauchsnormale.



Bild 7
Normalkondensator
C = 20 nF;
Vielfachmesser zum
Größenvergleich

Der Begriff *eichen* ist nur für die amtliche Tätigkeit vorgesehen. Das geeichte Normal erhält einen Eichstempel, und in einem Protokoll werden die festgelegten Meßwerte, die Umgebungsbedingungen (Temperatur usw.) und andere Einzelheiten aufgeführt. Die Eichungen sind in Abständen zu wiederholen; die Gültigkeit des Eichprotokolls ist daher stets befristet. Für eigene Prüfungen sollen Bezeichnungen wie abgleichen, vergleichen oder kalibrieren benutzt werden. Man „eicht" also keinen selbst hergestellten Vielfachmesser mit Hilfe eines Präzisionsgeräts, sondern man gleicht ihn ab.

Neben geeichten benutzt man im Meßlabor vielfach ungeeichte — aber eichfähige — oder auch nicht eichfähige Gebrauchsnormale. Widerstandsdekaden mit einem Fehler von $\pm$ 0,1 % sind z. B. nicht eichfähig; die Ungenauigkeit ist aber für viele Zwecke hinreichend klein.

2. Der Fehler in der Meßtechnik

2.1. Allgemeines

Als ein Amateur, der gerade eine Messung beendet hatte, einmal gefragt wurde, wie groß der Fehler in seiner Messung sei, antwortete er gekränkt, er habe überhaupt keinen Fehler gemacht. Das Mißverständnis kommt daher, daß das Wort „Fehler" in der Meßtechnik anders angewendet wird als im täglichen Leben, wie wir im folgenden sehen werden. In diesem Falle hat das Wort Fehler nicht die tadelnde Nebenbedeutung.

Messungen können verschieden zuverlässig sein. Die Aufgabe, eine Entfernung zu bestimmen, läßt sich durch Schätzen, durch eine Überschlagsmessung (Zählen von Schritten) oder durch eine präzise Messung mit einem Bandmaß lösen. Dabei kann die Schätzung unterschiedliche Aussagekraft haben, je nachdem, ob ein Laie oder ein erfahrener Beobachter den Wert angegeben hat. Auch ein Meßwert wird je nach Meßeinrichtung und Aufwand mehr oder weniger zuverlässig sein. Die Zahlenangabe für sich, etwa 80 m, hat deshalb nur wenig Wert, wenn man nicht weiß, wie sie zustande gekommen ist. Soll man sich auf plus oder minus 10 m darauf verlassen, liegt also der *wahre Wert* zwischen 70 m und 90 m, oder ist die Zuverlässigkeit so groß, daß man den wahren Wert in den Grenzen 80 ± 0,1 m, d. h. also zwischen 79,9 m und 80,1 m, erwarten kann? Die Bezeichnungen *Schätzung, Überschlagmessung* usw. geben nur einen groben Anhalt, und die genaue Beschreibung der Meßverfahren und -geräte wäre oft zu umständlich. Man erkennt, daß der Unterschied zwischen dem angegebenen Wert und dem wahren Wert für die Beurteilung des Meßergebnisses wichtig ist. Besonders trifft das zu, wenn das Meßergebnis anderen mitgeteilt werden muß.

Die genannte Größe, die Differenz zwischen dem Meßwert (*Ist-Wert*) und dem wahren Wert (*Soll-Wert*), wird als Fehler der Messung bezeichnet:

$$\text{Fehler} = \text{Ist-Wert} - \text{Soll-Wert}$$
$$F = I - S\,.$$

Die Reihenfolge „Ist-Wert minus Soll-Wert" muß beachtet werden, da es auf das Vorzeichen des Fehlers ankommt. Beträgt der Fehler -5 m, so heißt das, daß der Soll-Wert um 5 m größer ist als der gemessene Wert; das Maß wurde zu klein angegeben. Wenn man das Vorzeichen des Fehlers umkehrt und diese Größe, die manchmal auch Berichtigung genannt wird, zum Ist-Wert addiert, so ergibt sich der Soll-Wert oder wahre Wert, wie sich durch Umstellen der vorigen Formel erreichen läßt:

$$S = I - (\pm F)\,.$$

Im genannten Beispiel ist also das Vorzeichen umzukehren ($+5$ m) und dieser Wert zum Ist-Wert zu addieren.
Der relative Fehler F_{rel} wird errechnet aus:

$$F_{rel} = \frac{I - S}{S} \cdot 100\%$$

Relative Fehler gibt man stets mit positivem Vorzeichen an, also dem „Absolutwert" nach. Häufig findet man die Angabe, daß der relative Fehler 10^{-3} oder 10^{-4} sei. Das Verhältnis des Fehlers zum Soll-Wert ist also z. B. 10^{-3}, d. h., die beiden Werte verhalten sich wie 1:1000. Mit 100 multipliziert, ergeben sich Prozent. Ein Fehler 10^{-3} ist also $10^{-1}\% = 0{,}1\%$.
Die angeführten Gleichungen sind von Bedeutung, wenn man den Soll-Wert oder wahren Wert kennt. Beispielsweise lassen sich die Fehler elektrischer Meßgeräte durch Ausmessen *bekannter* Objekte (Gebrauchsnormale) leicht ermitteln. Ebenso kann man den Schätzfehler verschiedener Beobachter feststellen, wenn die betreffende Entfernung aus einer vorhergehenden Messung bekannt ist.
Praktisch läßt sich die Aufgabe oft schwieriger lösen. Der wahre Wert ist nämlich im allgemeinen unbekannt; mit Hilfsmitteln, die grundsätzlich nicht fehlerlos sind, soll man nicht nur einen Wert bestimmen, der möglichst wenig vom nicht feststellbaren wahren Wert abweicht, sondern auch eine Größe, die die Zuverlässigkeit kennzeichnet. In solchen

Fällen spricht man am besten von der Ungenauigkeit der Messung. Das Wort „Genauigkeit" sollte man dagegen in der Meßtechnik nicht anwenden. „Genau" gibt es nicht in verschiedenen Graden, und Messungen sind eben nie genau, wenn man im täglichen Leben auch von genauen und weniger genauen Messungen spricht.

Die Ungenauigkeit setzt sich oft aus zwei Teilen zusammen: aus einer Größe, deren Zahlenwert sich bestimmen läßt, und aus einem Anteil, für den man nur einen Bereich angeben kann. Der erste Bestandteil heißt *systematischer Fehler* oder *Unrichtigkeit*, der zweite *zufälliger Fehler* oder *Unsicherheit*:

Ungenauigkeit
- *Unrichtigkeit*, z. B. $-0{,}3$ V (alle angezeigten Werte sind um 0,3 V zu klein)
- *Unsicherheit*, z. B. $\pm 0{,}1$ V (die abgelesenen Werte liegen in einem Bereich $\pm 0{,}1$ V symmetrisch zum angezeigten Wert)

Wenn man die Unrichtigkeit kennt, so wird man sie im allgemeinen berücksichtigen. Zu Präzisionsmeßgeräten werden z. B. Fehlerkurven (Bild 8) mitgeliefert, aus denen die Unrichtigkeit für jeden Skalenpunkt abzulesen ist. Bei 20 Skalenteilen beträgt in diesem Fall die Unrichtigkeit $-0{,}12$ SkT. Der bessere Wert ist nach den aufgeführten Regeln demnach $(20 + 0{,}12)$ SkT. Nachdem die Unrichtigkeit berücksichtigt wurde, bleibt noch eine Unsicherheit übrig, die weder zahlen-

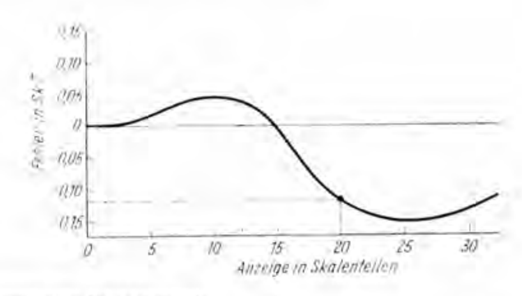


Bild 8 Fehlerkurve eines Präzisionsgeräts

mäßig noch dem Vorzeichen nach festliegt. Man kann sie daher auch nicht rechnerisch beseitigen.

Hier erhebt sich nun die Frage: Ist es nicht einfacher, den Meßfehler ganz zu vermeiden oder winzig kleinzuhalten, so daß man sich derartige Untersuchungen ersparen kann? Eine völlig fehlerfreie Messung läßt sich leider nicht ermöglichen. Man könnte zwar stets Präzisionsgeräte und -verfahren benutzen, jedoch würde dadurch jede Messung sehr aufwendig. Eine Stromstärke kann man beispielsweise mit Vielfachmessern auf etwa $\pm 1\%$ feststellen; mit anderen Meßeinrichtungen (Präzisions-Kompensationsmeßbrücken) ist der Fehler auf $\pm 0{,}001\%$ herabzudrücken. Diese Einrichtungen sind aber mechanisch und thermisch empfindlich, erfordern daher eine besonders sorgfältige Handhabung und kosten das Zehn- bis Hundertfache eines Vielfachmessers. Für jede Meßaufgabe müssen deshalb Verfahren und Geräte benutzt werden, bei deren Anwendung Meßfehler und Aufwand in zulässigen Grenzen bleiben. „Zu genau" zu messen, ist vor allem in der Betriebspraxis, wo es besonders auf den Zeitaufwand ankommt, ebenso falsch wie zu ungenaues Messen. Es beweist nicht etwa große Sorgfalt, sondern Mangel an wirtschaftlichem Denken. Es kann deshalb auch kein Universalmeßgerät für alle Meßaufgaben geben. Für jeden Zweck ist das einfachste (und billigste) Gerät zu wählen, dessen Fehler noch ein aussagekräftiges Meßergebnis gestatten. Natürlich muß man sich *vor* der Messung Gedanken über den Meßfehler machen.

Zu jeder Forderung, eine Größe zu messen, oder zu jedem Meßwert gehört eine Angabe über die zulässigen bzw. aufgetretenen Fehler. Mit der *Fehlerklasse* elektrischer Meßgeräte ist stets die Unsicherheit gemeint. Sie gilt für festliegende Meßbedingungen (Temperaturgrenzen, Frequenzen usw.) und wird in Prozenten des Endwerts angegeben. Der zufällige Fehler ist also, bezogen auf den Ausschlag, am Skalenende klein und wird bei geringeren Ausschlägen immer größer (Bild 9). Man soll es daher vermeiden, Werte abzulesen, die kleiner als $1/2$ bis $1/3$ des Endausschlags sind, sondern rechtzeitig auf den kleineren Bereich umschalten. Es sei erwähnt, daß ein Einzelexemplar eines Meßgeräts bedeutend kleinere

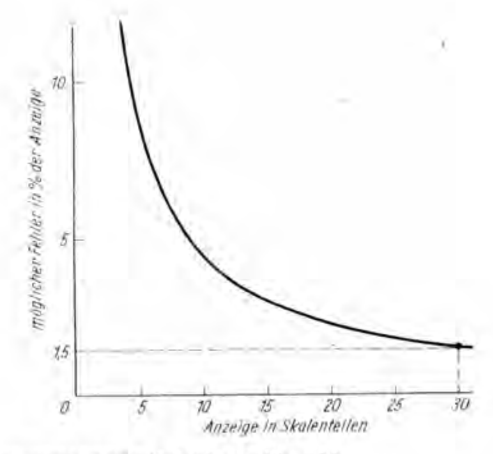


Bild 9 Zulässiger Anzeigefehler eines Meßgeräts der Klasse 1,5

Fehler zeigen kann, als die Klassengrenzen angeben. Vor allem gilt das für gleichbleibende Temperatur.
Wie entsteht aber der Meßfehler? Wenn man von Ablesefehlern usw. absieht, kommen vor allem drei Ursachen in Frage:

- Fehler durch Eigenschaften des Meßobjekts (z. B. die Kurvenform von Wechselgrößen);
- Fehler durch unvollkommene Meßverfahren und -geräte (Spannungsabfall in den Zuleitungen, Lagerreibung, Veränderung der Magnetwerkstoffe von Drehspulgeräten);
- Fehler durch Umwelteinflüsse (Fremdfelder, Temperatureinfluß, Feuchtigkeit).

Vor allem der Temperaturfehler spielt oft eine wesentliche Rolle. Im allgemeinen gelten Meßwerte, Skalenteilungen usw. für T = 20 °C.
Bisher wurde nur von den *statischen* Fehlern gesprochen. Oft kommen aber bei der Messung schneller Änderungen noch *dynamische* Fehler hinzu, die sich aus dem Zeitverhalten (Einstellzeit von Meßgeräten, Wärmeträgheit von Temperaturmeßfühlern usw.) ergeben.
Bekanntlich ist keine Regel ohne Ausnahme: Auf einem Teil-

gebiet der Meßtechnik, der schon erwähnten Digital- oder Zähltechnik, sind grundsätzlich fehlerfreie Messungen möglich. Eine Impulszahl oder Stückzahl kann im Prinzip fehlerlos bestimmt werden. Allerdings heißt das nicht, daß jede Zählung auch fehlerfrei sein muß.

2.2. Die Angabe von Meßergebnissen

Es ist üblich, durch die Art der Angabe eines Meßergebnisses Hinweise auf den Meßfehler zu geben. Die Angabe „12,0 V" sagt, so merkwürdig es klingen mag, etwas anderes aus als „12,00 V". Im ersten Fall wird nichts über die hundertstel Volt mitgeteilt. Der Meßfehler dürfte so groß sein, daß sich diese Angabe nicht lohnt. Man kann annehmen, daß der Fehler höchstens bei ein bis zwei Einheiten in der noch angegebenen Dezimale, also bei $\pm 0{,}1$ V bis $\pm 0{,}2$ V liegt. Im zweiten Fall wird für die erste Dezimalstelle garantiert; der Fehler dürfte bei einigen Einheiten der zweiten Dezimale liegen. Werte, die mit Vielfachmessern ($\pm 1{,}5\%$) festgestellt wurden, sollten – auch wenn man „genauer" ablesen kann – immer z. B. 67 V oder 14,4 mA lauten, *nicht* 67,52 V oder 14,41 mA. Vier- und mehrstellige Zahlen kommen nur bei Präzisionsmessungen vor.
In diesem Zusammenhang eine Bemerkung über das Rechnen mit Meßwerten. Wird ein Widerstand R aus einer Strom- und einer Spannungsmessung mit Hilfe eines Vielfachmessers ($\pm 1{,}5\%$) ermittelt, dann sieht die Rechnung oft so aus:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{13{,}7\ \text{V}}{0{,}70\ \text{A}} \left(\text{falsch ist: } R = \frac{13{,}7}{0{,}70}\right) ^{*)}$$

$$R = 19{,}5714\,\Omega\,.$$

*) Die Einheit (entweder V/A oder Ω) fehlt. Die Zeile

$$R = \frac{13{,}7}{0{,}70} = 19{,}57\ \Omega$$

ist keine Gleichung; eine unbenannte Zahl (13,7/0,70) kann nicht gleich einer benannten Zahl (19,57 Ω) sein. Diesen Fehler findet man in vielen Veröffentlichungen. Er verleitet dazu, in Größengleichungen Einheiten einzusetzen, die nicht zueinander passen.

Oft wird angenommen, je mehr Dezimalstellen, desto „genauer" das Ergebnis. Die Schlußfolgerung ist jedoch nicht richtig. Als prozentualen Fehler F einer Kette von nacheinander folgenden Geräten mit den prozentualen Teilfehlern F_1 bis F_n kann man ansehen

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + \ldots + F_n^2},$$

d. h., daß der Gesamtfehler im besten Fall gleich den einzelnen prozentualen Fehlern ist, meist aber größere Werte erreicht. In unserem Fall dürfte der Fehler wenigstens **1,5%** betragen. Das läßt sich auch aus der Erfahrung leicht ableiten, da **das Ergebnis** keine geringeren Fehler als die Ausgangswerte haben kann. Das Ergebnis $R = 19{,}57 \ldots \Omega$ hat also mindestens $\pm 1{,}5\%$, d. h. $\pm 0{,}3\,\Omega$ Fehler, so daß die Schreibweise

$$R = 19{,}6\,\Omega$$

($19{,}57\,\Omega$ aufgerundet) gerade noch zulässig ist. Man sollte solche anscheinend unbedeutenden Einzelheiten sorgfältig beachten, weil man sich sonst nicht richtig verständigen kann.

3. Meßverfahren und Meßfühler

3.1. Meßverfahren für elektrische Größen

3.1.1. Messung von Gleichstromgrößen

In diesem Abschnitt ist nicht die gesamte elektrische Meßtechnik behandelt, sondern es sind einige weniger bekannte Tatsachen beschrieben. Auch die allgemein verwendeten Meßgeräte und -verfahren, z. B. die üblichen Drehspulgeräte oder Brückenschaltungen, sollen nicht besprochen werden, um auf die Meßverfahren zur Erfassung nichtelektrischer Größen etwas ausführlicher eingehen zu können.
Die Meßwerke der üblichen elektrischen Meßgeräte nehmen im allgemeinen eine gewisse Leistung auf. Da ein Teil (Zeiger und Drehspule von Zeigerinstrumenten, Drehspule und Spiegel von Lichtmarkengeräten) mechanisch bewegt werden muß, haben die Geräte einen „Eigenverbrauch". Die Meßgeräte beeinflussen demnach den Meßkreis, so daß der Meßfehler größer wird. Der Fehler, der infolge des Eigenverbrauchs des Geräts auftritt, läßt sich zwar als systematischer Fehler rechnerisch berücksichtigen, jedoch unterbleibt das häufig. Dieser Einfluß des nicht unendlichen Innenwiderstands von Spannungsmessern bzw. des von Null verschiedenen Innenwiderstands von Strommessern wird vielfach zu gering bewertet. Wie sich mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes leicht berechnen läßt, muß ein Spannungsmesser, bei dem geringere Fehler als -5% auftreten sollen, einen Innenwiderstand haben, der beim 20fachen des Innenwiderstands der Spannungsquelle liegt. Als Spannungsquelle ist gegebenenfalls auch ein Widerstand anzusehen, von dem die Spannung an den Enden gemessen werden soll. Wird ein Fehler unter $1{,}5\%$ gefordert, so muß der Innenwiderstand des Meßgeräts das 66fache des Innenwiderstands der Quelle erreichen. Entsprechend darf ein Strommesser, der die Stromstärke eines gegebenen Kreises um weniger als $1{,}5\%$ verringern soll, nur einen Innenwiderstand haben, der bei

1/66 des Gesamtwiderstands des Kreises liegt. Zum besseren Verständnis ist ein praktisches Beispiel aufgeführt, daß dieses Problem verdeutlicht.

Wenn ein Strom der Größenordnung 10 mA mit einem der üblichen Taschengeräte (z. B. „Multiprüfer II", $R_i = 280\,\Omega$) gemessen werden soll, so verringert sich die Stromstärke durch das Einschalten des Meßgeräts um folgende Werte:

Gesamtwiderstand der Kreise (ohne Meßgerät)	Fehler
500 Ω	– 36%
1 kΩ	– 22%
2 kΩ	– 12%
5 kΩ	– 5%

Diese Fehler, die durch Veränderung der Eigenschaften des Meßkreises verursacht werden, sind in der Angabe des Meßgerätefehlers nicht enthalten. Die Ströme in niederohmigen Stromkreisen (Transistorschaltungen) und die Spannungen an hochohmigen Spannungsquellen oder Widerständen lassen sich mit einfachen, unempfindlichen Geräten nur sehr bedingt messen. Wenn sich das Verhalten einer Schaltung beim Anlegen eines Spannungsmessers, beim Einschalten eines Strommessers oder bei Bereichsänderungen des Geräts verändert, so ist stets der Innenwiderstand des Spannungsmessers zu gering bzw. der des Strommessers zu groß.

Der Innenwiderstand von Meßgeräten, der vom gewählten Bereich abhängig ist, wird verschieden angegeben. Bei Strommessungen wird oft der Spannungsabfall am Gerät aufgeführt. Daraus lassen sich nach dem Ohmschen Gesetz leicht der Innenwiderstand und bei Spannungsmessungen der Stromverbrauch ermitteln. Verbreitet sind für Spannungsmesser Angaben des Innenwiderstands, bezogen auf den Spannungsbereich, z. B. 20 kΩ/V. Diese Angabe gilt nicht für jeden Skalenwert, sondern für den Skalenendwert. Bei einem Meßbereich von 10 V hat ein solches Gerät z. B.

$$20\ \text{k}\Omega/\text{V} \cdot 10\ \text{V} = 200\ \text{k}\Omega$$



Bild 10 Meßwerk eines Quadrantenelektrometers

Innenwiderstand. Hochwertige Spannungsmesser (Vielfachmesser) haben 20 bis 100 kΩ/V. Je größer der angegebene Widerstandswert je Volt, um so weniger verfälscht das Gerät die Eigenschaft des Kreises. Der Eigenverbrauch guter Vielfachmesser liegt beim Meßbereich 250 μA — bei 10 bis 50 μW, beim Meßbereich 2,5 mA ∼ bei 0,5 bis 5 mW. Bei größeren Meßbereichen ist auch der Gesamteigenverbrauch entsprechend höher. Meßgeräte mit vorgeschaltetem Verstärker, etwa Röhrenvoltmeter, haben dagegen verschwindend geringe Eingangsleistungen. Wenig bekannt ist, daß es auch anzeigende Geräte *ohne Verstärker* gibt, die nahezu keinen Eigenverbrauch haben. Bild 10 zeigt das Meßwerk eines „Quadrantenelektrometers", bei dem die Drehung des Spiegels (der die Lichtmarke in der Skalenebene ablenkt) nicht durch ein Magnetfeld, sondern durch Anziehung ungleichnamig geladener Kondensatorbeläge verursacht wird. Geräte dieser Art werden als Spannungsmesser (für Gleich- und Wechselspannung) mit Meßbereichen von 0 · · · 10 bis 0 · · · 1500 V und einem Innenwiderstand über $10^{12}\,\Omega$ hergestellt. Die Eingänge sind erdfrei. Es können also auch Spannungen zwischen Punkten gemessen werden, die beide nicht auf Erdpotential liegen. Die Geräte eignen sich unter anderem zur Messung kleiner Kapazitäten und extrem großer Widerstände (weit über 1 GΩ) nach der Kondensatorentlademethode, die noch

beschrieben wird. Die Fehler der Quadrantenelektrometer liegen bei 0,5 bis 1% des Endwerts.

Bei den verschiedenartigen elektrischen Meßgeräten muß man zwischen Ungenauigkeit (Fehlerklasse des Meßgeräts) und Empfindlichkeit unterscheiden. Die elektrische Empfindlichkeit, nicht zu verwechseln mit der mechanischen Empfindlichkeit gegenüber Stößen und dergleichen oder der Empfindlichkeit gegenüber unsachgemäßer Handhabung (Überlastung usw.), wird in Einheiten der Anzeigeänderung zu Einheiten der Meßgrößenänderung gemessen, z. B. in mm/mA. Früher wurde oft das umgekehrte Verhältnis (z. B. in A/Skalenteilen) als Empfindlichkeit bezeichnet, doch ist das irreführend, weil kleine Zahlenwerte dann große Empfindlichkeiten bedeuten. Vielfachmesser (Klasse 1 bis 2,5) sind verhältnismäßig ungenaue und gleichzeitig unempfindliche Geräte. Viele Präzisionsgeräte der Klasse 0,5 bis 0,1 weisen ebenfalls einen hohen Eigenverbrauch auf. Andererseits haben die sehr empfindlichen Röhrenvoltmeter und Lichtmarkengalvanometer oft nicht unbedeutende Fehler (Klasse 1 bis 2,5). Direkt anzeigende, verstärkerlose Lichtmarkengalvanometer stellt man mit Empfindlichkeiten bis hinab zu 1 mm/nA und 1 mm/μV her. Sie werden in *niederohmiger* Ausführung ($R_i = 10$ bis $100\,\Omega$, Außenwiderstand maximal $R_a = 20$ bis $5000\,\Omega$) und in *hochohmiger* Ausführung ($R_i = 2{,}5$ bis $6\,k\Omega$, $R_a = 5$ bis $100\,k\Omega$) geliefert. Lichtmarkengalvanometer sind, wie viele andere empfindliche Geräte auch, vor dem Transport durch einen besonderen Hebel zu arretieren, d. h. mechanisch oder elektrisch zu sichern.

In vielen Fällen wird der ganze Meßbereich eines anzeigenden Meßgeräts nicht ausgenutzt. Oft will man kleine Änderungen eines Soll-Werts erfassen. Dafür eignen sich Schaltungen zur „Nullpunktunterdrückung" oder „Bereichsdehnung". In Bild 11 sind zwei bekannte Schaltungen mit Zenerdioden sowie die zugehörigen Skalenverläufe dargestellt. Der relative Meßfehler nimmt durch derartige Bereichsdehnungen erheblich ab. Mit Vielfachmessern kann in engen Bereichen ohne weiteres ein Meßfehler unterhalb $\pm 0{,}2\%$ des Meßwerts erzielt werden, wenn dafür gesorgt wird, daß die zeitliche Konstanz der

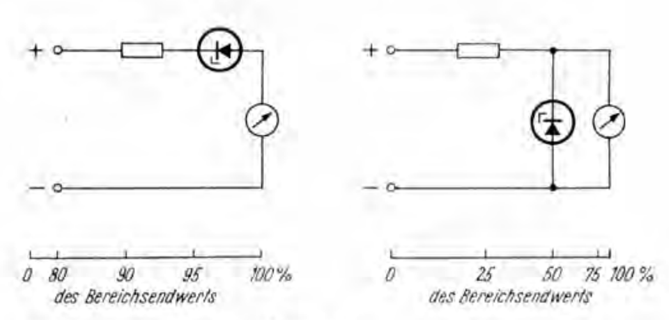


Bild 11 Bereichsdehnung mit Zenerdioden

Schaltung genügend groß ist. Diese Konstanz läßt sich z. B. durch den Einbau der Dioden in kleinen Thermostaten erreichen. Zenerdioden für Zenerspannungen von $U_Z = 5$ bis 6 V sind nur sehr wenig temperaturabhängig. Daher kann man oft auf einen Thermostaten verzichten. Die Schaltung wird zusammen mit dem Meßgerät durch Vergleich mit einem anderen Meßgerät abgeglichen. Der Zusammenhang zwischen Anzeige in Skalenteilen und dem Meßwert ist durchweg nichtlinear. Zum praktischen Gebrauch verwendet man am besten eine Kurvendarstellung auf Millimeterpapier.

Der Ohmsche Widerstand R eines Leiters ist

$$R = \frac{l \cdot \varrho}{A}$$

(l — Länge, ϱ — spezifischer elektrischer Widerstand, A — Querschnittsfläche).

Der Widerstand von Drähten und Spulen läßt sich also leicht errechnen. Leitungskupfer hat einen Wert von $\varrho \approx 0{,}018\,\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (bei 20 °C). Für eine Spule, die mit 50 m Kupferdraht von 0,16 mm Durchmesser bewickelt ist, ergibt sich ein Gleichstromwiderstand von

$$R = \frac{50\text{ m} \cdot 0{,}018\,\dfrac{\Omega\,\text{mm}^2}{\text{m}}}{0{,}08^2\,\pi\,\text{mm}^2}$$

$$R = 45\,\Omega.$$

Umgekehrt kann (vor allem bei sehr dünnen Drähten) der Durchmesser aus dem Widerstand und der Länge ermittelt werden. Der Widerstand von Metallen steigt bei Erwärmung um etwa 0,4%/grd an. Als zulässige Stromdichte von Spulen aus Kupferlackdraht wird rund 2,5 A/mm² angegeben. Eine Wicklung aus Draht mit 0,16 mm Durchmesser darf man *dauernd* nur mit

$$I = 2{,}5\ \mathrm{A/mm^2} \cdot 0{,}08^2\ \pi\ \mathrm{mm^2}$$

$$I = 50\ \mathrm{mA}$$

belasten. Die Spule mit 45 Ω Widerstand soll daher höchstens an $U = 45\ \Omega \cdot 50\ \mathrm{mA} = 2{,}25\ \mathrm{V}$ angeschlossen werden.
Meist lassen sich Widerstände nicht berechnen, sondern nur messen. Man kann dazu das Ohmsche Gesetz anwenden, also z. B. bei gleichbleibender, bekannter Spannung die Stromstärke messen. Ferner läßt sich der unbekannte Widerstand in einer Brückenschaltung mit bekannten Widerständen vergleichen; es ergibt sich eine besonders große Empfindlichkeit. Allerdings ist bei *Wheatstoneschen* Brückenschaltungen, die nicht abgeglichen sind, der Zusammenhang zwischen Widerstandsänderungen und Anzeige des Indikators nichtlinear. Mit einem Quotientenmesser (Kreuzspulmeßwerk) können auch Widerstände bei schwankender Spannung bestimmt werden. Ein solcher Quotientenmesser ist ein Drehspulgerät mit zwei gekreuzten Wicklungen, einem „Spannungspfad", der direkt an die Spannungsquelle angeschlossen wird, und einem „Strompfad". Das Meßgerät zeigt den Quotienten $U/I = R$ an (Bild 12). Kreuzspulmeßwerke haben oft keine mechanische Rückstellkraft. Sie bleiben also im stromlosen Zustand in einer Stellung stehen. Sehr große Widerstände ($R > 10\ \mathrm{M\Omega}$) lassen

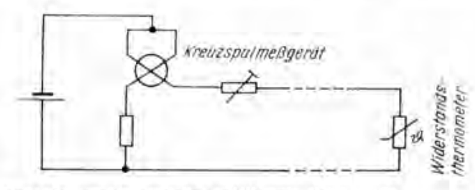


Bild 12 Schaltung eines Kreuzspulmeßwerks zur Widerstandsmessung

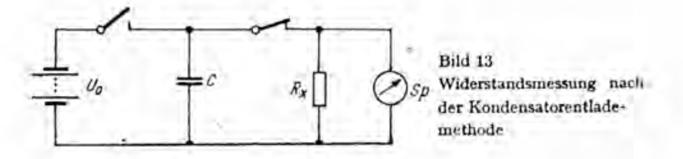


Bild 13
Widerstandsmessung nach der Kondensatorentlademethode

sich entweder nach der Strom-Spannungs-Methode mit hohen Spannungen ($U = 100$ bis 250 V) und empfindlichen Strommessern ausmessen, oder man benutzt die Kondensatorentlademethode. Dabei wird ein MP-Kondensator der Kapazität C auf eine bekannte Spannung U_0 aufgeladen und anschließend über den Widerstand R_x entladen (Bild 13). Der Spannungsmesser Sp muß einen wesentlich höheren Innenwiderstand als der zu messende Widerstand haben. Dafür kommen gute Röhrenvoltmeter, vor allem aber die beschriebenen Quadrantenelektrometer in Frage. Man stellt nun die Zeit T fest, in der die Kondensatorspannung auf 37% des ursprünglichen Wertes U_0 abgefallen ist. Der Widerstand R_x ergibt sich dann zu

$$R_x = \frac{T}{C}$$

(R_x in MΩ, C in μF und T in s).
Übrigens läßt sich in gleicher Weise — bei Entladung über bekannte Widerstände — die Kapazität von Metallpapierkondensatoren ermitteln, sofern T nicht zu klein wird. Es gilt entsprechend

$$C_x = \frac{T}{R}.$$

3.1.2. Messung von Wechselstromgrößen

Stromstärke und Spannung in Wechselstromkreisen lassen sich unter anderem mit Meßgeräten feststellen, die über einen Meßgleichrichter verfügen. Die Ungenauigkeit ist meist verhältnismäßig groß. Die Effektivwertanzeige gilt für sinusförmigen

Strom- und Spannungsverlauf. Präzisions-Wechselstrom- oder -spannungsgeräte sind oft nur für f = 50 Hz abgeglichen. Der Wechselstromwiderstand (Blindwiderstand) von Kondensator (X_C) und Spule (X_L) ist

$$X_C = \frac{1}{2 \pi fC}$$

und

$$X_L = 2 \pi fL .$$

Kapazitäten und Induktivitäten mißt man meist in Brückenschaltungen oder als Bestandteile von Schwingkreisen.
Katodenstrahloszillografen, die man zur Darstellung periodischer Vorgänge benutzt, lassen sich vor allem dann vielfältig als Meßgeräte anwenden, wenn die X-Ablenkung von außen zugänglich ist, also nicht allein durch das eingebaute Kippgerät betätigt werden kann. Geeignet sind Oszillografen unter anderem für den Vergleich zweier Frequenzen. Beispielsweise können mit der Netzfrequenz unbekannte Frequenzen bis etwa 2 kHz verglichen werden. Der Fehler hängt praktisch nur von der Frequenzkonstanz des Netzes ab; durch die Messung selbst entstehen also kaum Meßfehler. Auch aus den Normalfrequenzen (vor allem f = 1 kHz), die während der Sendepausen oder als Zeitzeichenfrequenz von Rundfunksendern abgestrahlt werden und die man z. B. mit guten Magnetbandgeräten aufnehmen kann, lassen sich ganzzahlige Vielfache und Teile im gesamten Tonfrequenzgebiet (zum Abgleich von Frequenzmessern!) ableiten. Eine der möglichen Schaltungen zeigt Bild 14. In diesem Fall werden die beiden Frequenzen f_1 und f_2

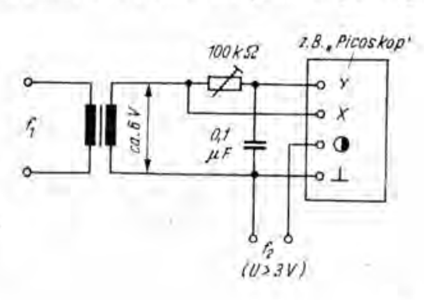


Bild 14
Schaltung zum Vergleich einer Frequenz mit der Netzfrequenz



Bild 15
Oszillografischer
Frequenzvergleich

(ihre Kurvenform spielt keine Rolle) auf einer etwas verformten Kreislinie verglichen. Bei stillstehendem Bild ist $f_2 = n \cdot f_1$, wobei n die Anzahl der hellen Abschnitte auf der Kreislinie darstellt. Entsprechend Bild 15 ergibt sich bei $n = 8$ und $f_1 = 50$ Hz für $f_2 = 400$ Hz. Weiter lassen sich Oszillografen bei Wechselspannungsmeßbrücken anwenden. Betrag und Phase können *unabhängig* voneinander abgeglichen werden, wodurch das Ausmessen verlustbehafteter Kapazitäten sehr erleichtert wird. Andere Anwendungsmöglichkeiten, z. B. zur direkten Frequenz- und Phasenmessung, sind in der Literatur (vgl. S. 96) beschrieben. Ein Oszillograf ist demnach ein vielseitiges Hilfsmittel nicht nur für Prüf-, sondern auch für Meßzwecke.

Damit soll die Beschreibung der elektrischen Bauteile und Meßgeräte abgeschlossen werden. Näheres findet der Leser auch in der Reihe *Der praktische Funkamateur*, Band 36 und Band 43.

3.2. Elektrische Messung nichtelektrischer Größen

3.2.1. Das Prinzip der Meßgrößenumformung

Wir benutzen Meßgeräte, weil sie eine empfindlichere und besser reproduzierbare Beurteilung von Größen erlauben, als

sie der Mensch mit seinen Sinnen geben könnte. Mit Meßgeräten lassen sich auch Größenarten zahlenmäßig erfassen, für die wir keine Sinnesorgane haben. So wäre z. B. eine quantitative Messung elektrischer Größen ohne Meßgeräte nicht möglich. Unmittelbar lassen sich nur Längen, Massen und Zeiten messen.

Meßgeräte sind zunächst gewissermaßen verbesserte Sinnesorgane des Menschen gewesen. Wir beschäftigen uns hier vor allem mit der Weiterentwicklung von Meßgeräten und -verfahren, deren Werte nicht vom Menschen abgelesen, sondern in maschinellen Einrichtungen selbsttätig weiterverarbeitet werden. Dafür ist es notwendig, daß die Meßfühler geeignete Signale abgeben, aus denen sich auf den Wert der Meßgröße schließen läßt.

Die Meßverfahren lassen sich nach dem Grad der Rückwirkung auf den Meßgegenstand oder auf den Meßvorgang in *berührende* und *berührungslose* Verfahren gliedern. Bei *berührenden* Verfahren (mechanische Messung mit Meßschraube, Einführen eines Thermometers in eine Flüssigkeit usw.) ist darauf zu achten, daß die zu messende Erscheinung nicht unzulässig verändert wird, beispielsweise infolge Deformierung oder durch Wärmeentzug. Verfälschung des Zustands tritt auch beim Einfügen elektrischer Meßgeräte in Stromkreise auf. Neben dem bereits erwähnten Eigenverbrauch kann z. B. auch die Kapazität des Eingangs zu Veränderungen der Eigenschaften des Meßobjekts führen.

Die von den Meßfühlern gelieferten Signale sind häufig so klein, daß sie verstärkt werden müssen. Die Aufgabe eines Verstärkers ist die *Leistungs*verstärkung, wenn auch oft die *Spannungs*verstärkung elektrischer Verstärker angegeben wird. Der Ausdruck „Leistungsverstärkung" besagt, daß (unter Energiezufuhr) die Leistung *des Signals* verstärkt werden soll. Verstärker verringern nicht den Fehler des Meßfühlers, sondern vergrößern ihn im Gegenteil. Auch die „Ansprechschwelle" des Meßfühlers wird durch Verstärkung nicht verbessert. Man kann nur die Leistung des Ausgangssignals vergrößern, wodurch sich unempfindlichere Anzeige- oder Auswertegeräte verwenden lassen. Durch die bekannte

Gegenkopplung, d. h. durch die Rückführung eines Teils der verstärkten Größe mit negativem Vorzeichen zum Verstärkereingang, wird zwar der Verstärkungsgrad geringer, jedoch läßt sich dadurch der Einfluß von Spannungsschwankungen und Exemplarstreuungen (der Röhren und Transistoren) erheblich vermindern. Neben einigen nichtelektrischen, hauptsächlich pneumatischen Verstärkertypen werden überwiegend Halbleiterverstärker, Röhrenverstärker und magnetische Verstärker verwendet. Ein großer Teil der im folgenden beschriebenen Meßverfahren gehört demnach zu den *elektronischen* Meßverfahren, d. h. den Verfahren, die den Stromfluß durch Vakuum, Gase oder Halbleiter ausnutzen.

Die Größen, die der Meßfühler liefert, werden oft mehrfach umgeformt, beispielsweise bei Quecksilberthermometern von thermischen Größen (Temperatur) über Zustandsänderungen der Flüssigkeit (Ausdehnung des Quecksilbers) zu geometrischen Größen (Anzeige durch die Länge der Flüssigkeitssäule). Im allgemeinen wird bei solchen Umformungen Linearität zwischen Ursache und Wirkung verlangt. Da das meist nur näherungsweise gilt, fügt jede Umformeinrichtung, die in die Kette vom Fühler zur Anzeige- oder Auswerteeinrichtung (Relais, Kippschaltung u. ä.) eingereiht ist, neue Fehler hinzu. Daher soll die Zahl der Glieder gering gehalten werden. Aus der großen Anzahl von Meßfühlern, Zwischengliedern (Verstärkern, Begrenzern usw.) und Endgliedern der Meßkette sollte man die Kombinationen auswählen, die einen fehlerarmen und einfachen Aufbau ergeben. Selbstverständlich sind Meßfühler, die bei sonst gleichen Eigenschaften (Preis, Größe, Zuverlässigkeit usw.) große Signale liefern und keinen Verstärker erfordern, günstiger als andere Fühler.

3.2.2. Vorteile gegenüber unmittelbaren Messungen

Ein wichtiger Sonderfall der genannten Umformungen, bei denen fast jede Größenart in jede andere Größenart umgewandelt werden kann, ist das Messen von Größenänderungen durch Beeinflussung eines elektrischen Stromkreises, die „elektrische (oder elektronische) Messung nichtelektrischer

Größen". Die zugehörigen Meßfühler sind z. B. geometrisch-elektrische oder thermisch-elektrische Wandler. Die Eingangsgröße des Wandlers ist also eine nichtelektrische Größe, die Ausgangsgröße eine elektrische Eigenschaft, z. B. eine Spannungsänderung, die Änderung des Innenwiderstands, der Induktivität oder der Kapazität.

Die elektrische Erfassung nichtelektrischer Größenarten hat einige wesentliche Vorteile, wodurch dieses Gebiet für industrielle Messungen in den letzten Jahren immer wichtiger geworden ist. Vor allem ermöglichen die Verfahren eine Fernübertragung der Meßwerte mit einfachen Mitteln. In technischen Anlagen versucht man, möglichst viele Anzeige-, Steuer- und Regelgeräte in einer „Meßwarte" unterzubringen, wodurch Kontrolle, Pflege und Reparatur erleichtert werden. Dafür ist eine Fernübertragung vieler Werte zumindest auf 50 bis 100 m Entfernung erforderlich. Mit anderen als elektrischen Mitteln läßt sich das oft nur recht umständlich verwirklichen. Elektrische Größen können außerdem leicht verstärkt und (z. B. zur Differenz- oder Quotientenbildung) miteinander verglichen werden. Da sich auch geringfügige Änderungen entsprechend verstärken lassen, sind elektrische Meßverfahren zur Erfassung kleiner mechanischer oder optischer Veränderungen geeignet. Vorteilhaft ist ferner, daß zur Anzeige, Regelung, Registrierung usw. gleichartige elektrische Geräte für alle Aufgaben brauchbar sind, nachdem die verschiedenen Größen in elektrische Größen umgeformt wurden. Dadurch vereinfachen sich Lagerhaltung und Reparatur, und es entstehen geringere Kosten.

Neben analogen Messungen kommen in technischen Anlagen auch zahlreiche binäre Meßaufgaben (Überwachung von Grenzwerten) vor. Einige analoge und binäre Meßverfahren sollen im folgenden besprochen werden.

3.2.3. Temperaturmessungen

Temperaturmessungen sind in den meisten Zweigen der Technik von großer Bedeutung, weil fast alle physikalischen

und chemischen Vorgänge von der Temperatur abhängen. Der Wichtigkeit entsprechend haben sich mehrere Verfahren zur Temperaturmessung herausgebildet.

Zunächst sind *aktive* (spannungserzeugende) Meßfühler und *passive* Fühler (meist mit veränderlichem Innenwiderstand) zu unterscheiden. *Aktive* Fühler sind die *Thermoelemente, passive* Meßfühler die *Widerstandsthermometer* und die *Thermistoren*. Alle diese Temperaturfühler sind berührende Fühler; daneben gibt es noch Meßeinrichtungen, die ohne körperlichen Kontakt mit dem Meßobjekt auskommen und den Körper infolgedessen nicht durch Wärmeableitung abkühlen oder anders beeinflussen können: die *Pyrometer*. Pyrometer können aktive oder auch passive Meßfühler enthalten.

Ein *Thermoelement* ist eine Verbindung zweier unterschiedlicher metallischer Leiter. Meist sind zwei dünne Drähte verlötet oder verschweißt. Bildet man einen Stromkreis (Bild 16) und bringt die beiden Lötstellen L_1 und L_2 auf verschiedene Temperaturen, so entsteht eine elektromotorische Kraft (EMK), und es fließt ein Strom. Hält man eine — die sogenannte kalte Lötstelle — auf gleichbleibender Temperatur, dann kann man die andere als Temperaturfühler verwenden: Die erzeugte EMK ist der Temperaturdifferenz zwischen „warmer" und „kalter" Lötstelle proportional.

In Tabelle 2 sind einige der wichtigsten Thermoelementpaare aufgeführt. Das Metall, das den Pluspol darstellt, ist zuerst genannt. Die Thermospannung sinkt in der genannten Reihenfolge ab; sie beträgt bei 500 °C etwa 30 mV (Cu-Konstantan) bis 5 mV (PtRh-Pt).

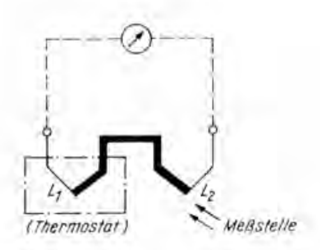


Bild 16 Schaltung eines Thermoelements

Tabelle 2 Thermoelementpaare

Bezeichnung	Temperaturbereich
Kupfer-Konstantan	− 200 ... + 400 °C
Eisen-Konstantan	− 200 ... + 700 °C
Chromnickel-Nickel	0 ... + 1000 °C
Platinrhodium-Platin	0 ... + 1300 °C

Die Vergleichsstelle („kalte Lötstelle") wird im allgemeinen durch einen kleinen Thermostaten auf + 50 °C gehalten. Für Präzisionsmessungen benutzt man meist PtRh-Pt. Diese Paarung verändert sich im Laufe der Zeit am wenigsten; allerdings ist Platin- und Platinrhodiumdraht sehr teuer.
Thermoelemente werden in geeigneten Schutzrohren (z. B. aus Keramik) vielseitig für technische Zwecke, vor allem zur Messung in weiten Temperaturbereichen, eingesetzt. Nachteilig ist die geringe Spannung, wodurch verhältnismäßig teure Verstärker bzw. Kompensatoren notwendig sind.
Beim *Widerstandsthermometer* wird die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands der Metalle von der Temperatur ausgenutzt. Als Leitermaterialien verwendet man Nickel oder Platin. Der Nennwert des Widerstands (bei 0 °C) beträgt 100 Ω, als Gesamtwiderstand der Leitungen ist 10 Ω festgelegt. Die verhältnismäßig geringen Widerstandsänderungen werden oft durch Quotientenmeßwerke angezeigt. Mit Widerstandsthermometern mißt man meist nur Temperaturen bis 800 °C.

Thermistoren sind für den Amateur von besonderer Bedeutung. Neben der bekannten Verwendung in Temperaturkompensationsschaltungen eignen sie sich vorzüglich als Meßwertaufnehmer.
Thermistoren sind keramische Halbleiterwiderstände mit starkem negativem Temperaturkoeffizienten. Ihr Widerstand sinkt je Grad Temperaturerhöhung um 4 bis 2% ab. Wie aus Bild 17 zu erkennen ist, hängt der Temperaturkoeffizient selbst von der Temperatur ab. Für uns kommen vor allem die Ausführungen in Frage, die sich äußerlich nur wenig von 1/20-W-

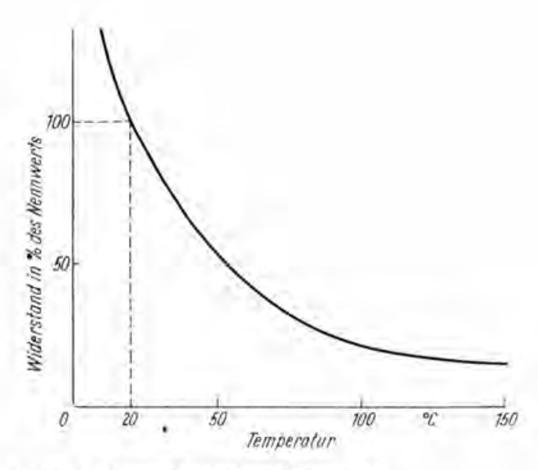


Bild 17 Widerstandsverlauf eines Thermistors bei unterschiedlichen Temperaturen

Widerständen unterscheiden. Als Nennwert des Widerstands gibt man den Widerstand bei 20 °C an.
Bei Versuchen mit Thermistoren ist vor allem zu beachten: In ungünstig dimensionierten Schaltungen neigen Thermistoren zum „Durchgehen". Durch den Stromfluß erwärmen sie sich. Der Innenwiderstand sinkt dadurch ab, der Strom steigt infolgedessen weiter an, der Thermistor erwärmt sich noch mehr usw. Ohne Begrenzerwiderstand brennt der Thermistor durch; die Gefahr besteht vor allem bei Spannungsquellen mit geringem Innenwiderstand.
Näheren Aufschluß über die Verwendbarkeit des Thermistors gibt die Strom-Spannungs-Kennlinie (Bild 18). Der fallende Ast ist bei manchen Typen weniger ausgeprägt; uns kommt es zunächst auf das Grundsätzliche an. Die Kennlinie wird in ruhender Luft aufgenommen und gibt das statische Verhalten (nach langer Zeit), jedoch *nicht* das „Übergangsverhalten" an. Bei geringen Spannungen (bezogen auf den Widerstandswert und den Typ) erwärmt sich der Thermistor zunächst durch den Stromfluß nicht. Das Anfangsstück ist nahezu linear, der Thermistor verhält sich wie ein Ohmscher Widerstand; dann

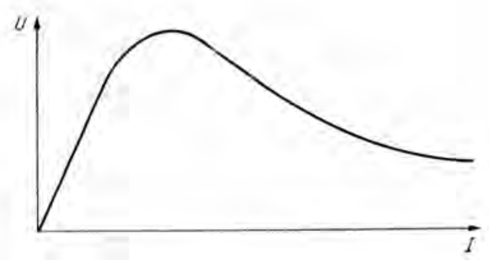


Bild 18 U-I-Kennlinie eines Thermistors, Umgebungstemperatur konstant

setzt langsam die Erwärmung ein. Bis zum höchsten Punkt der Kurve bleibt das Verhalten stabil; ein „Durchgehen" ist nicht möglich. Danach folgt aber ein Kennlinienbereich mit fallender Kennlinie. Ein stabiler Betrieb ist – wie bei anderen Bauteilen mit fallender Kennlinie, z. B. Glimmlampen – nur möglich, wenn der Arbeitspunkt durch einen Ohmschen Widerstand festgelegt wird. Thermistoren können im übrigen mit Gleich- oder Wechselspannung betrieben werden.
Wie schon erwähnt wurde, benutzt man Thermistoren überwiegend zur Kompensation und für einige Steuer- und Regelaufgaben. Uns soll an dieser Stelle lediglich die Verwendung bei der Temperaturmessung beschäftigen. Analoge Temperaturmessungen lassen sich nur im ersten, steigenden Teil der Kennlinie ausführen. Zwei verstärkerlose Schaltungen mit den zugehörigen Temperatur-Stromstärke-Charakteristiken werden in Bild 19 wiedergegeben. Je nach Typ sind mit Thermistoren

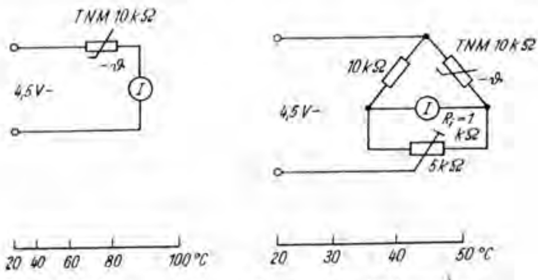


Bild 19 Einfache Schaltungen zur Temperaturmessung mit Thermistoren

Messungen bei Temperaturen bis zu 500 °C möglich. Bei verhältnismäßig hohen Temperaturen wird die Empfindlichkeit auf Grund des Verlaufs des Temperaturkoeffizienten (Bild 17) geringer. Thermistoren müssen für viele Zwecke mechanisch geschützt werden, z. B. durch Einbetten in Gießharz oder Anbringen in keramischen Schutzrohren.

Wenn die Nichtlinearität hingenommen werden kann und das stets erforderliche Abgleichen jedes Einzelexemplars nicht stört, lassen sich die Thermistoren als Temperaturfühler vielseitig einsetzen. Der technische Aufwand ist sehr gering; somit entstehen auch geringe Kosten. Die Stromstärken sind so groß, daß z. B. Rundrelais direkt geschaltet werden können. Vor allem zur Grenzkontaktgabe (Über- oder Unterschreiten eines Festwerts) eignen sich Thermistoren gut. Die Temperaturanzeige folgt plötzlichen Änderungen allerdings nicht; der Thermistor braucht je nach Typ und Armatur (Schutzrohre usw.) einige Sekunden bis Minuten, um die Endtemperatur anzunehmen. Thermistoren zeigen hin und wieder eine nicht unerhebliche Änderung ihrer Werte im Betrieb (Alterung). Die Meßfühler müssen daher — vor allem zu Beginn des Probebetriebs — gelegentlich überprüft werden.

Es gibt noch eine zweite Möglichkeit, binäre Temperaturmessungen mit Thermistoren auszuführen: unter Verwendung einer thermischen Kippstufe. Man erreicht dadurch hohe Empfindlichkeit und vermeidet Fehler durch die Differenz von Anzugs- und Abfallstromstärke der Schaltrelais. Allerdings ist es unbedingt nötig, die Kennlinie des Thermistortyps (aus eigenen Messungen oder aus den Zusammenstellungen des Herstellers) zu kennen. Außerdem muß, wie auch bei analogen Temperaturmessungen mit Thermistoren, die Betriebsspannung stabilisiert sein. Wenn man den labilen Teil der Thermistorkennlinie mit der Widerstandsgeraden eines Ohmschen Widerstands zum Schnitt bringt, so entstehen zwei mögliche Arbeitspunkte (Bild 20). Bei geringfügigen Temperaturänderungen geht die Schaltung von einer Lage in die andere über, weil der Thermistor entweder mehr Wärme erzeugt, als er abgeben kann, wodurch sich die Eigentemperatur schnell erhöht, oder umgekehrt weniger Wärme erzeugt, als zur Auf-

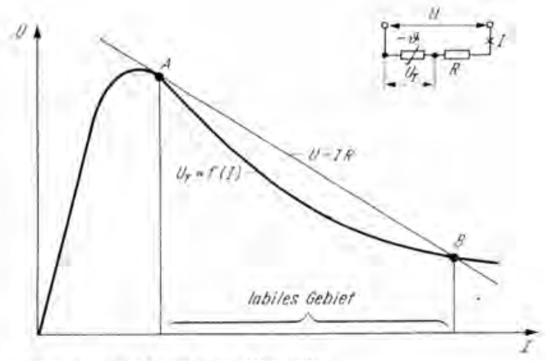


Bild 20 Arbeitspunkte einer thermischen Kippstufe

rechterhaltung seines thermischen Zustands nötig wäre. In Bild 21 ist ein Schaltungsbeispiel dargestellt. Besonders für thermische Kippstufen geeignet sind die Thermistoren TNM 150 k (R = 150 kΩ) und TNM 100 k (R = 100 kΩ). Die Arbeitstemperatur des Thermistors darf nur bis zu der vom Hersteller angegebenen zulässigen Grenze (150 bis 500 °C, je nach Ausführung) steigen. Schaltungen dieser Art können zur Grenzkontaktgabe bei Erreichen eines Grenzwerts im Zimmertemperaturbereich benutzt werden. Die Umgebungsluft muß ruhen oder eine gleichförmige Geschwindigkeit haben; andernfalls ist der Kipp-Punkt auch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Schaltungen dieser Art lassen sich im übrigen nicht nur zur Unterscheidung geringfügiger Temperaturunterschiede, sondern auch zum Auslösen eines Schaltvorgangs bei geringen Spannungsänderungen oder Änderungen des vorgeschalteten Ohmschen Widerstands benutzen.

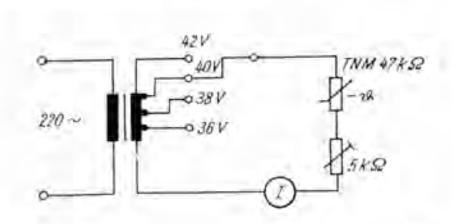


Bild 21
Thermische Kippstufe

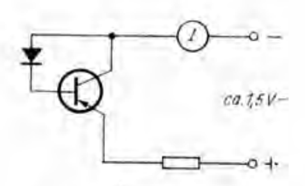


Bild 22 Schaltung zur Temperaturmessung mit Ge-Diode

Von den vier Kenngrößen, *Umgebungstemperatur*, *Wärmeableitverhältnisse* (Art und Geschwindigkeit des umgebenden Mediums), *Spannung* und *Vorschaltwiderstand*, müssen jeweils drei gleichbleiben, damit Änderungen der vierten Kenngröße festgestellt und zur Auslösung des Stromsprungs verwendet werden können.

Vom VEB *Keramische Werke* Hermsdorf werden neben Heißleitern (Thermistoren) neuerdings auch Kaltleiter hergestellt, d. h. Halbleiterwiderstände mit starkem positivem Temperaturkoeffizienten des Widerstands. Im Gegensatz zu Heißleitern lassen sie sich nur in einem begrenzten Temperaturbereich anwenden (der Typ TP 40/90-7 z. B. zwischen 90 und 170 °C) und haben sehr niedrige Widerstandswerte (30 bis 40 Ω). Sie sind vor allem für Schaltzwecke bei Über- oder Unterschreiten einer Grenztemperatur bestimmt.

Zur Temperaturmessung eignen sich ferner temperaturabhängige Eigenschaften üblicher Halbleiter, z. B. der Sperrstrom von Ge-Dioden. Für Amateurzwecke sind solche Lösungen schon oft beschrieben worden. Die zulässige höchste Temperatur liegt je nach Typ bei 50 bis 100 °C. In Bild 22 ist eine der bekannten Lösungen dargestellt. Die Sperrstromänderungen betragen − 6 bis − 10%/grd, sind also größer als die Widerstandsänderungen von Thermistoren. Dioden (oder Transistoren) eignen sich daher gut als Meßfühler im Raumtemperaturbereich. Die Spannung soll nicht über 1,5 V liegen, damit Fehler durch Eigenerwärmung vermieden werden.

Pyrometer benutzt man meistens zur Temperaturmessung an glühenden Körpern, Schmelzen u. dgl. Sie gestatten Temperaturmessungen aus größerer Entfernung. Eine einfache Möglichkeit der Temperaturmessung bietet sich, indem man mit einer Sammellinse oder einem Hohlspiegel die Wärmestrahlung auf einen Fühler konzentriert. Als Fühler benutzt man unter



Bild 23 Pyrometer „Pyrocord"

anderem Thermoelemente, Thermistoren und wärmeempfindliche Fotowiderstände (PbS-Widerstände). Je nach Fabrikat muß die Meßtemperatur mindestens + 400 bis + 800 °C betragen. Nach hohen Werten hin ist die Anwendung von Pyrometern nicht begrenzt, da die Strahlung meßbar geschwächt werden kann. Pyrometer benutzt man daher allgemein, um Temperaturen oberhalb 1300 °C zu messen, in seltenen Fällen (wenn sich Meßfühler nicht anlegen lassen) auch für geringere Temperaturen, z. B. zur Messung der Temperaturen von Achslagern von Waggons oder der Temperaturen erhitzter Stahlteile in Härtereien. In Bild 23 ist ein Pyrometer für technische Zwecke des VEB *Meßgerätewerk „Erich Weinert"*, Magdeburg, gezeigt.

3.2.4. Längen- und Wegmessungen

Die geometrische Form von Körpern, die sich immer auf Längenmaße zurückführen läßt, oder der Weg eines Teiles kann auf vielfältige Weise in elektrische Größen umgesetzt werden. Ein einfaches, allerdings nicht allgemein anzuwendendes Ver-

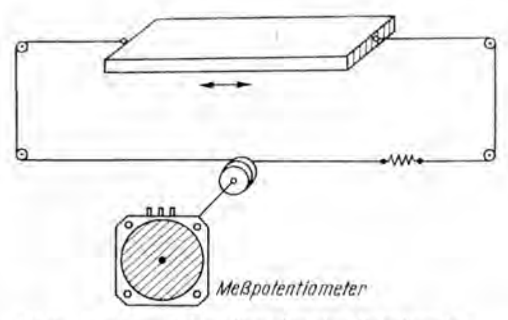
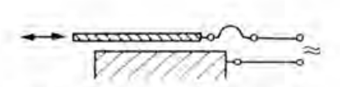


Bild 24 Wegmessung durch Verstellen eines Potentiometers

fahren ist die *mechanische Verstellung des Schleifers eines Potentiometers* (Bild 24). Der Meßfehler kann leicht unter ± 0,5% des Endwerts gehalten werden. Das Verfahren eignet sich nur dann, wenn genügend große Kräfte und Wege vorhanden sind, z. B. zur Fernanzeige der Stellung von Maschinen, bei denen die zusätzliche Belastung keine Rolle spielt. Man gewinnt dabei ausreichend große Signale, und die Meßeinrichtung ist einfach und billig. Als Meßpotentiometer eignen sich nur Drahtpotentiometer, keine Schichtpotentiometer. Für präzise Messungen stellt man besondere Geberpotentiometer her.

Auf *kapazitivem Wege* können Längen und Wege durch Änderung der Plattenflächen oder des Plattenabstands (Bild 25) gemessen werden. Kapazitive Meßverfahren erfordern meist einen bedeutenden meßtechnischen Aufwand.

Von den *induktiven* Längenmeßverfahren, die man oft benutzt, soll die Änderung des Luftspalts einer Drossel (Bild 26) und der Differentialtransformator (Bild 27) genannt werden. Die Wirkung beruht auf der Änderung des Blindwiderstands durch Induktivitätsänderung bzw. auf der Veränderung des Kopp-



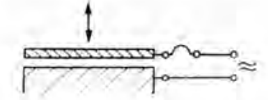


Bild 25 Kapazitive Wegmessung

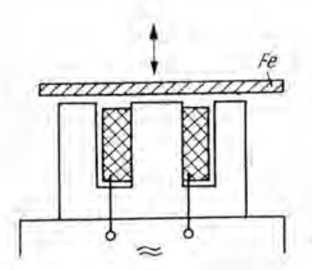


Bild 26 Induktive Wegmessung mit Drossel

lungsgrads. Differentialtransformatoren lassen sich verhältnismäßig leicht selbst anfertigen. Serienmäßig hergestellte Ausführungen haben Meßbereiche von $0 \cdots 10\,\mu m$ bis $0 \cdots 100$ mm und Meßfehler von etwa 0,1%. Eine binäre induktive Wegbegrenzungseinrichtung ist in Bild 28 gezeigt. Durch Einführen des Eisenkerns nimmt die Induktivität der Spule so weit zu, daß die Stärke des Wechselstroms stark abnimmt und die Lampe erlischt.

Bei Längen- und Wegmessungen in technischen Anlagen ist man oft geneigt, verhältnismäßig komplizierte Einrichtungen

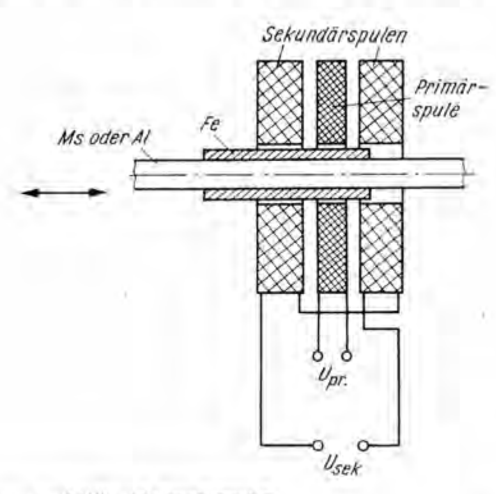


Bild 27 Wegmessung mit Differentialtransformator

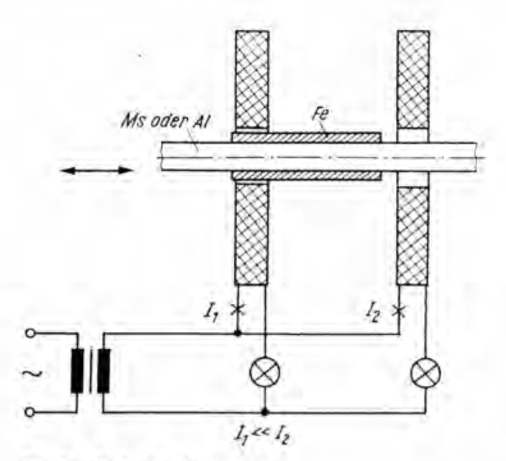


Bild 28 Binäre Wegbegrenzung

an Stellen anzubringen, wo einfache kontaktgebende Einrichtungen ausreichten. Der richtig verwendete Stufenschalter oder die Kontaktbahn ist also nicht durchweg veraltet. Bild 29 zeigt schließlich noch eine optisch-elektrische Einrichtung mit zwei gleichartigen Gitterrastern und einem lichtelektrischen Empfänger. Bei Verschiebungen des einen Rasters in Pfeilrichtung nimmt man in der ganzen Fläche abwechselnd Verdunklung und Aufhellung wahr. Die Lichtimpulse werden mit einer Zähleinrichtung gezählt und sind ein Maß für die Relativbewegung der beiden Raster. Durch fotografische Verkleinerung einer Vorlage können die Abstände zwischen den Gitterstrichen weniger als 0,01 mm betragen, wodurch der Längenmeßfehler ebenfalls unter 0,01 mm liegt.

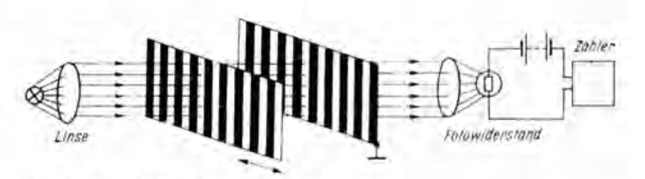


Bild 29 Digitale optisch-elektrische Wegmessung

3.2.5. Massebestimmungen (Wägungen)

Die häufig gestellte Aufgabe, die Masse von Körpern zu bestimmen, löst man meist dadurch, daß die Meßaufgabe auf Längen-, Winkel- oder Kraftmessungen zurückgeführt wird. In Bild 30 sind einige solcher Möglichkeiten dargestellt.

Piezoelektrische Geber sind aktive Meßwandler, die eine Kraft oder einen Druck in eine proportionale elektrische Spannung verwandeln. Sie beruhen auf der Ladungstrennung bei Druck auf Kristalle. Vor allem werden sie für die Erfassung schneller Vorgänge verwendet; der gerätetechnische Aufwand ist erheblich.

Dehnungsmeßstreifen sind neuartige Elemente, mit denen sich geometrische Größen verschiedener Art in Widerstandsänderungen umformen lassen. Ein Dehnungsmeßstreifen besteht aus einem sehr dünnen, mehrfach hin und her geführten Widerstandsdraht auf einer Papierschicht (Bild 31). Der Streifen wird auf Träger, Balken usw. aufgeklebt. Jeder Meßstreifen kann nur für ein Meßobjekt benutzt werden. Belastet man den

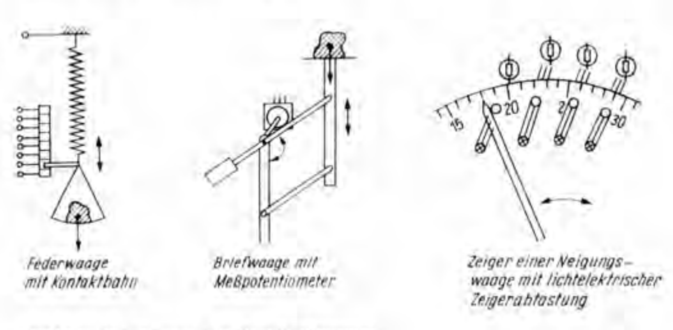


Bild 30 Anordnungen zur Massebestimmung

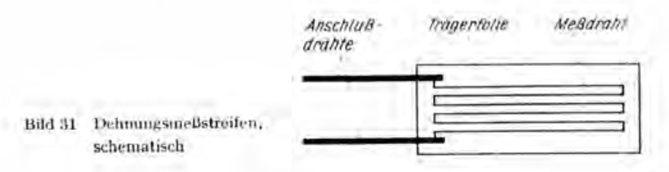


Bild 31 Dehnungsmeßstreifen, schematisch

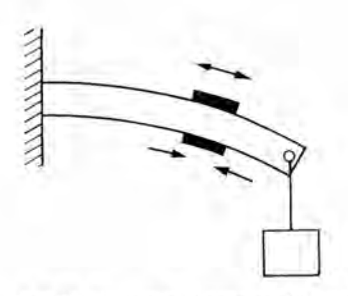


Bild 32 Elektrische Wägung mit Biegestab

Träger, so wird der Widerstandsdraht (bei Zugbelastung) länger und dünner, wodurch der Widerstand ansteigt, bzw. (bei Druckbelastung) kürzer und dicker, wobei der Widerstand abnimmt. Die auftretenden Dehnungen und Stauchungen sind sehr klein; ein serienmäßig ausgeführtes Gerät hat beispielsweise Meßbereichsendwerte von 0,1‰ bis 1% Dehnung. Das Hauptanwendungsgebiet von Dehnungsmeßstreifen ist die elektrische Wägetechnik. Ein einseitig befestigter Balken verbiegt sich bei Belastung; an der Oberseite tritt eine Zugbelastung, an der Unterseite eine Stauchung auf. In Bild 32 ist dieser Zustand stark übertrieben dargestellt. In der Technik wählt man die Abmessungen des Balkens so, daß nur winzige Formänderungen (hundertstel bis zehntel Millimeter) auftreten. Die aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen, von denen oft vier – um die Temperatureinflüsse auf den Widerstandswert auszuschalten – in einer *Wheatstone*-Brücke zusammengeschaltet sind, erfahren also kleine Widerstandsänderungen, die verstärkt und angezeigt werden. Diese Methode erfordert z. Z. noch einen hohen Geräteaufwand; der Meßfehler liegt bei 0,1 bis 0,5% des Endwerts. Neuerdings werden auch Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen angeboten, deren Widerstandsänderung bei gleicher Dehnung um zwei Größenordnungen höher ist. Sie erlauben einen verhältnismäßig einfachen Meßaufbau.

Ein neuartiges elektrisches Wägeverfahren (nach *H. Jakubaschk)* beruht auf der Leitfähigkeitsänderung des leitenden

Plastes Dolacol K (VEB *Chemiewerk* Greiz-Dölau). Bei Belastung nimmt sein Widerstand ab. Zumindest zur überschlägigen Messung können solche Wägeeinrichtungen für viele Zwecke verwendet werden. Die Kosten sind verschwindend gering.

3.2.6. Füllstandsmessungen

Bei Füllstandsmessungen zieht man oft die schon aufgeführten Meßverfahren heran. Auf Grund der technischen Bedeutung sollen einige Möglichkeiten noch einmal genannt werden.
Ausschlaggebend für die Wahl des Verfahrens sind die Eigenschaften der (meist flüssigen) Substanz, vor allem ihre elektrische Leitfähigkeit, ihre chemische Aggressivität sowie ihre Temperatur. Die Schwimmerverfahren mit elektrischem Abgriff (Bild **33**) lassen sich meist verwenden und ergeben häufig eine robuste, wenig fehleranfällige Lösung. Ein anderes einfaches Verfahren beruht auf der elektrischen Leitfähigkeit. Vor allem eignen sich solche Schaltungen (Bild **34**) für Sicherungseinrichtungen, wenn beispielsweise ein Wasserstand nicht über eine obere Marke steigen soll.
Ein anderes, für beliebige Flüssigkeiten mit niedriger Temperatur (bis 100 °C) geeignetes Verfahren verwendet die schon beschriebenen Thermistoren. Ein Thermistor wird auf etwa 150 bis 200 °C aufgeheizt und hat dabei in Luft einen bestimmten Innenwiderstand. Taucht er dagegen in eine Flüssigkeit

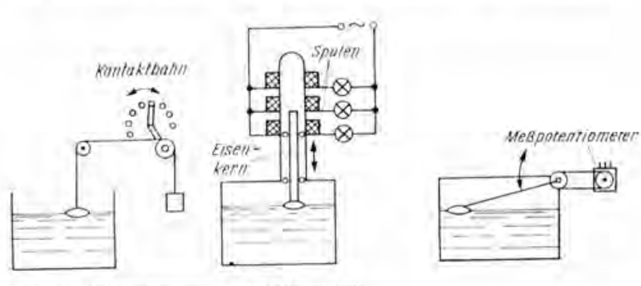


Bild 33 Füllstandsmessung mit Schwimmern

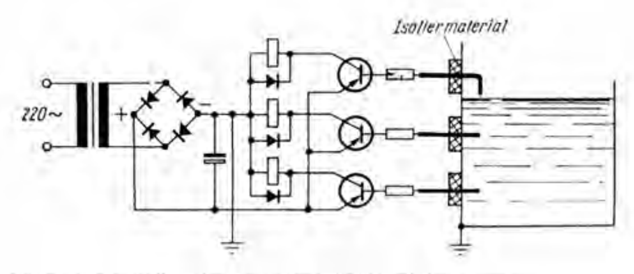


Bild 34 Binäre Füllstandsmessung durch Leitfähigkeitsmessung

ein, so erhöht sich die Wärmeableitung sprunghaft, die Temperatur verringert sich, und der Innenwiderstand steigt stark an. Am besten verwendet man eine thermische Kippschaltung (vgl. S. 48). Durch einen elektrischen Antrieb wird der Thermistor stets so eingestellt, daß er gerade nicht in die Flüssigkeit eintaucht. Die Stellung der Antriebseinrichtung, die analog (mit Untersetzungsgetriebe) oder digital (Kontaktgeber und Zähler) festgestellt werden kann, ist ein Maß für die Füllhöhe. Besonders einfach sind binäre Füllstandsbegrenzer mit zwei fest angebrachten Thermistoren. Sie können (bei aggressiven Flüssigkeiten) gegebenenfalls in Glas eingeschmolzen werden.
Kapazitive Füllstandsmeßeinrichtungen (Bild 35) benutzt man vor allem für staubförmiges Gut. Da sich die Dielektrizitätskonstante der Substanzen meist von der der Luft unterscheidet, ändert sich die Kapazität des zwischen Sonde und Gefäß gebildeten Kondensators. Allerdings ergeben sich verhältnismäßig geringe Änderungen, so daß die verstärkenden

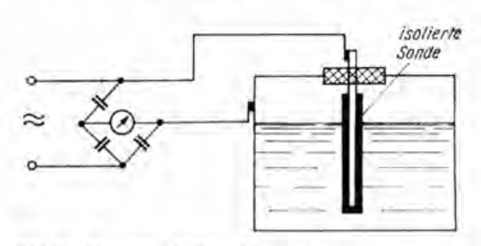


Bild 35 Kapazitive Füllstandsmessung

Einrichtungen oft teuer sind. Ein weiteres, gelegentlich angewendetes Füllstandsmeßverfahren besteht in der Bestimmung der Masse des ganzen Behälters. Mit einem Dehnungsmeßstreifen wird beispielsweise die geringe Durchbiegung tragender Konstruktionsteile festgestellt, die ein Maß für die auftretenden Kräfte und damit auch ein Maß für die Masse des Behälterinhalts ist.

3.2.7. Andere Meßverfahren

Einige weitere Meßverfahren, die für betriebliche Zwecke eine Rolle spielen, seien noch aufgeführt. Aus der elektrischen Leitfähigkeit schwacher Säuren, Basen und Salzlösungen kann bei konstanter Temperatur direkt die Konzentration ersehen werden. Da chemisch reines Wasser nahezu isoliert, lassen sich schon geringste Salzmengen (Kochsalz, Kaliumchlorid usw.) aus der Leitfähigkeit von Wasser nachweisen. Auch der Feuchtigkeitsgehalt fester Körper (Briketts, Hölzer), der Wassergehalt nichtleitender Flüssigkeiten (Lösungsmittel u. ä.) oder pulverförmiger Substanzen (Mehl, Zement) lassen sich aus der elektrischen Leitfähigkeit bestimmen. Meist werden dazu die bekannten Brückenschaltungen benutzt. Bei festliegenden äußeren Verhältnissen, wie den Korngrößen von Pulvern, der Temperatur von Flüssigkeiten, dem Anpreßdruck der Fühlerelektroden, läßt sich der Wassergehalt unmittelbar aus der Leitfähigkeit errechnen. Meßeinrichtungen dieser Art werden mit Proben bekannten Wassergehalts abgeglichen.
Zeitmessungen lassen sich analog, z. B. nach der Kondensatoraufladе- bzw. -entlademethode (S. 38), oder digital durch Summierung von Impulsen mit festliegendem Zeitabstand ausführen. Als Impulsquelle wird für einfache Zwecke das

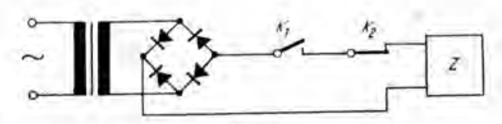


Bild 36 Digitale Zeitmessung mit 100-Hz-Impulsen

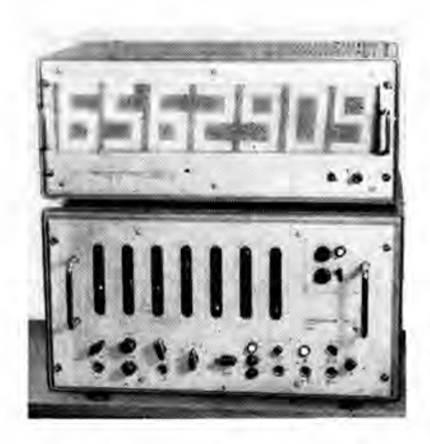


Bild 37
Digitaler Zeitintervallmesser mit Großsichtanzeige

Wechselstromnetz benutzt, aus dem nach Zweiweggleichrichtung (ohne Glättung) 100-Hz-Impulse entnommen werden können. Die Zeit zwischen dem Schließen des Kontakts K 1 (Bild 36) und dem Öffnen des Kontakts K 2 ergibt sich aus der Anzahl der Impulse, die im Zähler Z summiert wurden. Zeigt der Zähler z. B. 812 Impulse an, so war die Zeitdifferenz 8,12 s. Für höhere Ansprüche, vor allem zum Erfassen sehr kurzer Zeiten, werden Röhren- und Transistorzähler mit Quarz-Normalfrequenzgebern benutzt. Die auftretenden Fehler sind verschwindend gering. Ein serienmäßiges Gerät, der „Zeitintervallmesser 3502" des VEB *Funkwerk* Erfurt (Bild 37), erlaubt beispielsweise das Messen von Zeiten von etwa 10 s bei Fehlern unter 10 μs, d. h. mit einem relativen Fehler von maximal 0,0001 %.
Periodisch auftretende schnelle Vorgänge lassen sich auf dem Bildschirm eines Katodenstrahloszillografen sichtbar machen und durch Vergleich mit einer bekannten Frequenz ausmessen. Für viele technische Aufgaben werden Stückzähler gebraucht. Man verwendet neben den älteren mechanischen Zählern vor allem elektrische Impulszähler. Elektromechanische Zähler (Bild 38) erlauben je nach Ausführung Impulsfrequenzen von 10 bis 160 Hz. Viele praktische Aufgaben, z. B. die Feststellung der Stückzahl hergestellter Gegenstände an einer Maschine,



Bild 38 Elektromechanische Impulszähler

lassen sich damit einwandfrei lösen. Nur für hohe Impulsfrequenzen benutzt man elektronische Zähler. Sie werden für Grenzfrequenzen bis 10 MHz geliefert und sind nicht billig. Mit Zählern können nicht nur reine Stückzählungen ausgeführt, sondern verschiedene verwandte Aufgaben gelöst werden. *Vorwahlzähler* zählen beispielsweise bis zu einer einstellbaren Zahl, geben beim Erreichen dieser Zahl einen Ausgangsimpuls und beginnen wieder bei 0. Sie eignen sich zum Abzählen und zur Portionierung von Massengütern. So kann man z. B. selbsttätig je 500 Schrauben in einen Behälter füllen lassen. Auch Frequenzen und Größen, die sich als Frequenz darstellen lassen (z. B. Drehzahlen), können durch digitale

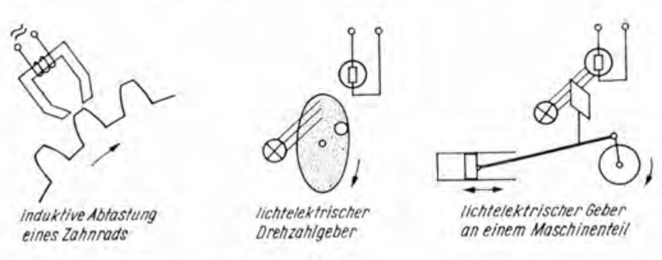


Bild 39 Digitale Geber für Impulszähler

Einrichtungen mit sehr geringem Fehler (bei 1 kHz unter 0,1%) gemessen werden. Die zu den Zähleinrichtungen gehörenden Geber sind mechanisch betätigte Kontakte, lichtelektrische, induktive oder kapazitive Geber. Bild 39 zeigt einige neuere Möglichkeiten. Besonders mit lichtelektrischen Empfängern (Fotowiderständen, Fotodioden usw.) lassen sich einfache Zähleinrichtungen aufbauen.

3.3. Nichtelektrische Messungen

Neben der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen spielen auch die älteren Meßverfahren ohne elektrische Hilfsmittel keine unwesentliche Rolle. In einigen Fällen kommen die Vorteile der elektrischen Meßverfahren, die bereits angeführt wurden, nicht zur Geltung. Für eine Reihe von Temperatur- und Druckmessungen genügt beispielsweise die Anzeige an Ort und Stelle; es wäre unzweckmäßig, dafür elektrische Geräte einzusetzen. Wenn in dieser Broschüre auch vor allem elektrische Verfahren beschrieben werden, so kann man nicht außer acht lassen, daß es daneben andere, ebenfalls gebräuchliche Verfahren gibt. Mechanische, pneumatische oder hydraulische Einrichtungen zeichnen sich oft durch geringen Preis und große Betriebssicherheit aus. Man soll daher die verhältnismäßig einfachen nichtelektrischen Meßverfahren und -geräte nicht von vornherein als veraltet ansehen. Insgesamt nimmt allerdings der Anteil dieser Geräte, bezogen auf die Zahl von Meßeinrichtungen in ganzen Anlagen, ständig ab, wenn man von den neueren (pneumatischen und radioaktiven) Verfahren absieht.

3.3.1. Temperaturmessungen

Als einfachstes Temperaturmeßgerät ist das Flüssigkeitsthermometer mit Quecksilber- oder Alkoholfüllung allgemein bekannt. Es wird als Zimmer- oder Laborthermometer verwendet, besondere Ausführungen auch als Fieberthermometer, Minimal-Maximal-Thermometer usw. In technischen Anlagen

Bild 40 Quecksilberkontaktthermometer

setzt man es auf Grund der Zerbrechlichkeit und des erschwerten Ablesens nur in besonderen Fällen ein. Mit eingeschmolzenen Grenzkontakten wird es dagegen oft — hauptsächlich für die Messung und Regelung von Luft- und Wassertemperaturen — benutzt. In Bild 40 ist eine von außen einstellbare Ausführung, ein sogenanntes Kontaktthermometer, gezeigt. Der Kontakt soll nur mit einem Strom von einigen Milliampere belastet werden. Wichtig sind vor allem die geringe Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Ausschaltpunkt (je nach Meßbereich 0,1 bis 0,5 grd) und die sehr gute Langzeitkonstanz. Allerdings stören Größe und mechanische Empfindlichkeit. Andere Ausdehnungsthermometer, die man technisch in gewissem Umfang einsetzt, sind die Metallstabthermometer und die Flüssigkeitsfederthermometer. Ein Metallstabthermometer besteht aus zwei Stoffen mit unterschiedlichem Temperaturausdehnungskoeffizienten (z. B. Porzellanstab in Stahlrohr), die gemeinsam der Meßtemperatur ausgesetzt werden. An einem Ende sind beide Stoffe fest verbunden; am anderen Ende läßt sich eine der Temperatur proportionale Längendifferenz feststellen. Der Längenunterschied ist sehr gering (meist unter 1 mm), jedoch können große Kräfte aufgebracht werden. Durch passende Übersetzung lassen sich z. B. Ventile (ohne Hilfsenergie) direkt betätigen. Flüssigkeitsfederthermometer enthalten wie andere Flüssigkeitsthermometer eine Ausdehnungsflüssigkeit, beispielsweise Quecksilber. Die Druckzu- oder -abnahme infolge der Temperaturänderungen kann durch eine Metallkapillare bis zu 40 m fernübertragen und durch eine

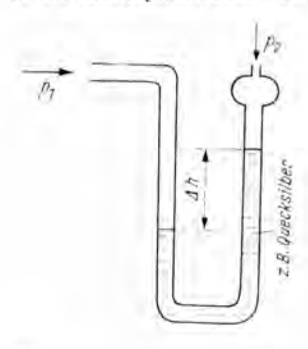


Bild 41 U-Rohr-Manometer

Art Manometer angezeigt werden. Zur binären Messung von Temperaturen verwendet man ferner die bekannten Bimetallstreifen. Zwei Bleche aus unterschiedlichen Materialien sind zusammengewalzt. Bei Temperaturerhöhung dehnen sich die beiden Bestandteile unterschiedlich aus; infolgedessen wölbt sich das freie Ende nach oben oder unten. Oft werden solche an sich nichtelektrischen Teile zur elektrischen Kontaktgabe (z. B. in Bügeleisen) benutzt.

3.3.2. Druckmessungen

Als Druckmeßeinrichtungen werden teilweise noch U-Rohr-Manometer verwendet, die mit Quecksilber oder (für geringe Drücke) mit Wasser gefüllt sind. Der gemessene Druckunterschied Δp ist proportional der Masse der Flüssigkeitssäule, die über die Gleichgewichtslage hinausragt (Bild 41). Die verbreiteten „Manometer" sind mechanische Druckmeßeinrichtungen, bei denen eine Rohr-, Platten- oder Kapselfeder elastisch verformt wird. Die Federbewegung wird auf einen Zeiger übertragen, der vor einer Kreisskale angeordnet ist (Bild 42).



Bild 42 Rohrfedermanometer, Außen- und Innenansicht

Zu den Druckmeßeinrichtungen können pneumatische Längen- und Formmeßgeräte gerechnet werden. Die Meßfühler (geometrisch-pneumatische Wandler) sind geeignet geformte Düsen, aus denen ein feiner Luftstrom austritt. Wenn sich ein Hindernis vor der Düse befindet, ist der Luftdruck im Rohr groß; bei freier Düse herrscht ein geringer Innendruck. Durch Druckmessung gelingt es, mit sehr geringem Fehler (allerdings auch bei kleinem Meßbereich, z. B. $0 \cdots 10\ \mu m$) Längendifferenzen oder Formabweichungen festzustellen. Pneumatische Meßverfahren (und zugehörige Rechenglieder, Speicher, Zähler usw.) sind verhältnismäßig neu, und auf einigen Gebieten, wie bei der Messung von Serienerzeugnissen in der Metallindustrie oder bei der Steuerung und Regelung in chemischen Betrieben, werden sie zunehmend eingeführt.

3.3.3. Andere Meßaufgaben und Lösungen

Von den nichtelektrischen Meßverfahren, die bisher nicht berücksichtigt worden sind, ist vor allem die Massebestimmung mit mechanischen Waagen zu nennen. Waagen werden für die verschiedensten Meßbereiche hergestellt (Laborfeinwaagen, Briefwaagen, Neigungswaagen usw. bis zu Gleiswaagen für Schienenfahrzeuge). Der Meßfehler ist meist überaus niedrig (0,1 bis 0,01% des Meßwerts). „Bandwaagen" sind mechanische Wägeeinrichtungen für Schüttgüter, wobei ein Transportband gewissermaßen die „Wägeschale" bildet. Mit Bandwaagen stellt man also bei laufendem Band die Masse des bewegten Stoffstroms fest.

Eine Reihe betrieblicher Geräte zur Flüssigkeits- und Gasanalyse, zur Messung des Heizwerts von Gasen und zur Durchflußmessung arbeiten ebenfalls überwiegend mit nichtelektrischen Mitteln. Zur Bestimmung der Durchflußmenge von klaren Flüssigkeiten (z. B. Wasser) und Gasen eignen sich „Schwebekörper-Strömungsmesser" (Bild 43), bei denen die Höhenstellung eines frei in einem konischen Glasrohr schwebenden Körpers ein Maß für die Durchflußmenge in l/min oder m^3/h ist. Viele Füllstandsmeßgeräte arbeiten mit ein-

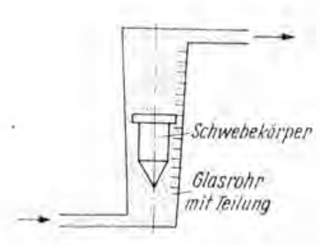


Bild 43 Schema eines Schwebekörper-Durchlaufmessers

fachen Schwimmern, deren Höhenlage den Stand von Flüssigkeiten angibt. Zu den nichtelektrischen Verfahren ist, obwohl es elektrische Hilfsmittel benutzt, schließlich noch das Meßverfahren mit künstlich radioaktiven Isotopen zu rechnen.
Die meisten der genannten, oft schon vorhandenen nichtelektrischen Meßeinrichtungen bieten Möglichkeiten, bei geringem Aufwand Kontaktvorrichtungen anzubauen. Dadurch wird beispielsweise ein Bimetallstreifen zum Schalter, ein Manometer zum Element, um elektrische Geber zu betätigen (Potentiometer), ein Strömungsmesser zum Grenzwertschalter oder eine Neigungswaage zum Meßglied einer elektrisch-mechanischen Dosiervorrichtung. Einige mit Kontaktausgängen ausgerüstete Geräte der beschriebenen Art werden auch serienmäßig geliefert, unter anderem die schon erwähnten Kontaktthermometer, die bei einer festen oder auch einstellbaren Temperatur einen Kontakt schließen, und Kontaktmanometer. Zu beachten ist, daß viele dieser Geräte schleichend Kontakt geben. Bei geringeren Ansprüchen an die mechanische Belastbarkeit und an das zeitliche Verhalten (Trägheit der mechanischen Teile!) können solche einfachen Geräte oft als Meßfühler von Steuer- und Regelanlagen, besonders für Zweipunktregler, die nur zwei Zustände („zu warm“, „zu kalt“) unterscheiden, verwendet werden. Die niedrigen Kosten ermöglichen häufig recht rationelle Lösungen. Darum sollte man stets prüfen, ob nicht neben Meßverfahren mit rein elektrischen Hilfsmitteln (ohne bewegte Teile), die grundsätzlich für alle Aufgaben verwendet werden können, auch elektromechanische oder nichtelektrische Meßeinrichtungen, die elektrische Ausgangssignale liefern, brauchbar sind.

4. Die Beurteilung von Meßwerten

4.1. Aufgabenstellung

Angenommen, es sollen die elektrischen Eigenschaften einer großen Anzahl (vieler tausend) gleichartig hergestellter Widerstände bestimmt werden. Der Prüfer wird ein Meßgerät benutzen, das keine systematischen Fehler hat, also nicht (z. B. infolge unrichtigen Abgleichs) zu große oder zu kleine Werte anzeigt, und das einen hinreichend kleinen zufälligen Fehler (z. B. 0,5% des Meßbereichsendwerts) aufweist. Man muß in diesem Fall den Widerstandswert der gegebenen großen Menge (der Gesamtheit) feststellen.
Zunächst ist verständlich, daß nicht jeder einzelne Widerstand ausgemessen werden kann. Aus der großen Anzahl muß man eine kleinere Anzahl, eine Stichprobe, willkürlich entnehmen. Es ergibt sich nun die Frage, wieviel Stück man entnehmen soll und was aus den Einzelwerten geschlossen werden darf.

Leichtfertig wäre es, wenn der Prüfer nur *einen* Widerstand messen würde. Da sich die Einzelexemplare durch die Herstellung unterscheiden und die Meßbedingungen geringfügig schwanken (Temperatur, Spannung usw.), kann zufällig ein verhältnismäßig großer oder kleiner Widerstandswert festgestellt werden. Die Behauptung, daß alle Exemplare der Gesamtheit die gleichen Eigenschaften hätten, wäre demnach unbegründet. Mißt er einige Werte und bildet den Mittelwert, so hängt das Ergebnis weniger von der zufälligen Auswahl der Teile ab. Je mehr Einzelwerte herangezogen werden, desto weniger wird das Mittel aus den Meßwerten vom wahren Wert abweichen, also vom Mittel aus allen vorhandenen Einzelwerten. Dieser wahre Wert läßt sich in der Regel auf Grund des Aufwands nicht bestimmen.
In Tabelle 3 sind die an einer größeren Lieferung von Widerständen gemessenen Werte und die Fehler gegenüber dem Mittel von 200 Einzelwerten aufgeführt. Es soll angenommen

Tabelle 3 Meßwerte an Widerständen $R = 47\ k\Omega \pm 10\%$

Einzelwerte [in kΩ]	Mittel [in kΩ]	Fehler [in %]
44	44,0	− 3,7
44 49 50	47,7	+ 4,3
44 49 50 45 46	46,8	+ 2,4
44 49 50 45 46 47 45 49 43 44	46,2	+ 1,1
44 49 50 45 46 47 45 49 43 44		
43 45 45 48 44 46 47 43 46 46	45,8	+ 0,2
. . . (50 Einzelwerte)	45,8	+ 0,2
. . . (200 Einzelwerte)	45,7	—

werden, daß sich das Mittel aus den 200 Werten nicht vom wahren Wert unterscheidet.
Man erkennt, daß der Fehler um so kleiner wird, je größer die Stichprobe ist. Wie es ähnlich schon bei der Anwendung der Meßgeräte erwähnt wurde, heißt das aber nicht, daß man sehr viele Einzelexemplare messen soll, um den Fehler „so klein wie möglich" zu halten. Man wird vielmehr umgekehrt aus der Größe des Fehlers, der noch zugelassen werden kann, die Anzahl der erforderlichen Einzelmessungen bestimmen. Welcher Fehler in einem Falle noch zulässig ist, muß man jeweils sorgfältig prüfen. Nicht selten werden übertrieben hohe Forderungen gestellt, was die Messung unnötig kompliziert. Man will außerdem feststellen, welche Schlüsse aus einer gewissen Anzahl von Einzelmessungen gestattet sind. Dazu sollen einige Formeln genannt und an Beispielen erklärt werden. Solche Rechnungen sind von großer praktischer Bedeutung, und zwar nicht nur für die Kontrolle der Qualität von Serienerzeugnissen, sondern allgemein auch zur Beurteilung der Schlüsse, die man aus gegebenen Einzelmeßwerten ziehen darf, ohne sie durch subjektive Ansichten zu verfälschen. Dieser Zweig der angewandten Mathematik, von dem ein Ausschnitt besprochen wird, heißt mathematische Statistik. Die Statistik beschäftigt sich stets mit Sachverhalten, für die *mehrere* Zahlenwerte

vorliegen. An Hand *eines* Wertes lassen sich keine statistischen Betrachtungen anstellen.

4.2. Die Normalverteilung und ihre Kenngrößen

Es ist lehrreich, zu untersuchen, wie sich eine größere Anzahl von Einzelmeßwerten (mindestens 50) um den Mittelwert verteilt. Man kann beispielsweise Größenklassen bilden — wobei man durch Abzählen feststellt, wieviel Einzelwerte in die betreffende Klasse fallen — und danach eine grafische Darstellung zeichnen. In Bild 44 sind zwei solcher Kurven wiedergegeben. Man erwartet schon aus der Anschauung, daß in der Mitte des Bereichs mehr Einzelwerte liegen als am Rande; entsprechend der Kurvenform, die an eine Glocke erinnert, werden solche Verteilungskurven als *Glockenkurven* oder (nach dem deutschen Mathematiker *Gauß*) als *Gaußsche Normalverteilungen* bezeichnet.
Normalverteilungen entstehen häufig dann, wenn auf die Einzelwerte unterschiedliche Einflüsse wirken, durch die die Werte sowohl größer als auch kleiner werden können. Beide Fälle sollen gleich wahrscheinlich sein; daraus ergibt sich die

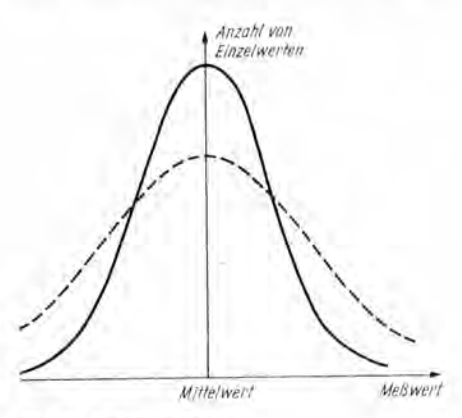


Bild 44 Verteilungskurven

Symmetrie der Kurve. Einflüsse, die man als „zufällig" bezeichnet, führen also trotzdem zu gesetzmäßigen Zusammenhängen, zu *Gesetzen der großen Anzahl.* Nur bei sehr vielen Einzelwerten entstehen vollständig glatte Kurven. Bei 50 bis 100 Werten nähern sich die Verteilungskurven aber allmählich den in Bild 44 dargestellten Verläufen. Die folgenden Betrachtungen gelten immer für *Gaußsche Normalverteilungen.* Ist man nicht sicher, ob sich in einem Falle die Einzelwerte derart verteilen, so mißt man (einmal) eine größere Anzahl davon und trägt sie entsprechend Bild 44 auf. Neben *Gaußschen Normalverteilungen* können auch andere Arten der Verteilung auftreten. Liegen andere Verteilungsarten vor, so wird nach Formeln gerechnet, die nicht näher behandelt werden können (vgl. Literaturverzeichnis).

Das Maximum der Glockenkurve liegt beim arithmetischen Mittel. Aus Bild 44 erkennt man aber, daß die Lage des Maximums allein, also das Mittel einer Meßreihe, nicht die Eigenschaft der Gesamtheit vollständig wiedergeben kann. Die beiden dargestellten Verteilungen haben zwar den gleichen Mittelwert, doch ist ein Schluß von der Meßreihe, deren Einzelwerte weniger streuen, sicherer als der von der anderen Meßreihe. Wir brauchen also eine Kenngröße für die Breite der Verteilung. Aus bestimmten Gründen hat man als Maß dafür den Abstand der Wendepunkte auf der Verteilungskurve

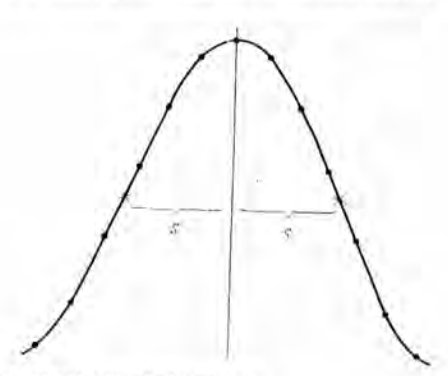


Bild 45 Geometrische Bedeutung der Standardabweichung

vom Mittel gewählt (Bild 45). Diese Größe bezeichnet man als *Gaußsche Standardabweichung* s.
Mit anderen Worten: Um ein Meßergebnis vollständig anzugeben, genügt es nicht, das arithmetische Mittel aufzuführen. Statt alle Einzelwerte mitzuteilen (was sehr umständlich wäre), kann man eine Zahl für die Streuung der Einzelwerte um das Mittel (die Standardabweichung s), festlegen. Die Standardabweichung kommt in allen Formeln vor.
In der Statistik begegnet man oft dem Begriff der Wahrscheinlichkeit. Vollkommen „sichere" Aussagen liefert die Statistik nicht. Das heißt nicht, daß die Aussagen (nach dem alltäglichen Sprachgebrauch) unsicher wären. Vielmehr wird stets der unter gewissen Voraussetzungen wahrscheinlichste Fall betrachtet. Einzelne Abweichungen sind also durchaus möglich. Diese Einschränkung mindert jedoch den Wert statistischer Rechnungen nicht; man muß stets die Zuverlässigkeit der errechneten Zahlenwerte beachten. Je besser die Voraussetzungen erfüllt sind, desto aussagekräftiger ist die Rechnung. Die Annahme einer *Gaußschen Verteilung* der Einzelwerte muß beispielsweise in Zweifelsfällen nachgeprüft werden. Der auf allen Gebieten der Meßtechnik zutage getretene große (auch materielle) Nutzen der Statistik hat die Frage, ob solche Rechnungen sinnvoll sind, längst zugunsten der mathematischen Statistik entschieden.

4.3. Ermittlung der Standardabweichung

Zur Ermittlung der Standardabweichung gibt es eine Reihe von Verfahren, so verschiedene rechnerische Methoden, Verfahren mit besonderen Vordrucken (Wahrscheinlichkeitspapier) und mit Schablonen. Es soll nur ein Rechenverfahren angegeben werden. Andere Möglichkeiten sind in Storm, *Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle*, beschrieben.
Die Standardabweichung s ergibt sich aus

$$s = +\sqrt{\frac{\Sigma (x_n - x)^2}{n - 1}}$$

(x_n — die Einzelwerte, $\bar{x}$ — der Mittelwert aus den Einzelwerten, n — die Anzahl von Einzelwerten).
Das Σ (Sigma) ist das Zeichen für Summierung. Man hat also die Differenzen zwischen jedem Einzelwert und dem Mittel zu bilden, diese Beträge zu quadrieren, die Quadrate zusammenzuzählen, durch (n — 1) zu teilen und daraus die Wurzel zu ziehen.

Beispiel (Zahlenwerte von S. 69, alle Werte in kΩ)
Einzelwerte x_n : 44 49 50 45 46
Mittelwert $\bar{x}$: 46,8
Anzahl von Einzelwerten n = 5

x_n	$(x_n - \bar{x})$	$(x_n - \bar{x})^2$
44	−2,8	7,8
49	+2,2	4,8
50	+3,2	10,2
45	−1,8	3,2
46	−0,8	0,6
	Summe:	26,6

$$\frac{26,6}{n-1} = \frac{26,6}{4} = 6,65$$

$$s = +\sqrt{6,65}$$

$$s = 2,6$$

Die Standardabweichung hat die gleiche Dimension wie die Einzelwerte. Bei der Rechnung wurden die Einheiten (in diesem Fall Kiloohm) zur besseren Übersicht weggelassen.
Die Meßreihe aus den Werten 44 kΩ, 49 kΩ, 50 kΩ, 45 kΩ und 46 kΩ hat also den Mittelwert $\bar{x}$ = 46,8 kΩ und die Standardabweichung s = 2,6 kΩ.

4.4. Der Vertrauensbereich des Mittelwerts

Wenn wir aus verhältnismäßig wenigen Einzelwerten einer Stichprobe auf eine Gesamtheit von Werten schließen, so

entsteht eine Unsicherheit. Der wahre Wert kann also vom angegebenen Mittelwert abweichen. Die Differenz zwischen beiden wird gering sein, wenn die Einzelwerte dicht zusammenliegen und viele Einzelwerte beim Errechnen des Mittelwerts herangezogen wurden. Eine große Differenz ergibt sich dagegen, wenn nur wenige, stark streuende Einzelwerte vorliegen.

Die Differenz, die zahlenmäßig abgeschätzt werden soll, hängt außerdem vom Meßtechniker ab. Will man sehr sichere Werte erhalten, so wird man einen breiteren Bereich angeben. Das Risiko der Schätzung, ein Maß sei 5 ± 1 mm, es liege also zwischen 4 und 6 mm, ist viel geringer als bei 5 ± 0,1 mm. Es soll im folgenden mit dem technisch üblichen Risiko gearbeitet werden, wobei etwa 95% der Abschätzungen richtig sein müssen. Es sind also 5% von Werten zugelassen, die außerhalb der anschließend errechneten Grenzen fallen. In einigen Fällen, vor allem dann, wenn es sich um Menschenleben oder große Werte handelt (Fahrzeug- und Flugzeugindustrie, Erprobung von Arzneimitteln usw.), läßt man dagegen nur 1 bis 0,001% Irrtümer zu.

Der *Vertrauensbereich des Mittelwerts*, ein sehr wichtiger Wert, ist der Bereich, in dem man den wahren Wert vermuten darf.

Er errechnet sich aus

$$\text{Vertrauensbereich } V = \bar{x} \pm c_1 \cdot s$$

($\bar{x}$ — errechnetes Mittel, s — Standardabweichung, c_1 — eine von der Anzahl von Einzelmessungen abhängige Konstante — Tabelle 4).

Tabelle 4 Werte für die Konstante c_1

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c_1	9,0	2,5	1,6	1,24	1,05	0,93	0,84	0,77	0,72
n	12	14	16	18	20	25	30	40	60
c_1	0,64	0,58	0,53	0,50	0,47	0,41	0,37	0,32	0,26

Beispiel (von S. 73)
Der wahre Wert, also das Mittel aus allen Einzelwerten, das man nicht feststellen kann, liegt in diesem Beispiel innerhalb:

$$V = x \pm c_1 \cdot s$$

$c_1 = 1{,}24$ (aus Tabelle 4 für $n = 5$)

$$V = 46{,}8\ \mathrm{k\Omega} \pm 1{,}24 \cdot 2{,}6\ \mathrm{k\Omega}$$

$$V = 43{,}6\ \mathrm{k\Omega} \ldots 50{,}0\ \mathrm{k\Omega}\,.$$

Das Ergebnis, das man aus den 5 Einzelwerten erhält, ist also: Der wahre Wert, d. h., das Mittel aus allen Widerstandswerten, liegt zwischen den Grenzen 43,6 kΩ und 50,0 kΩ. Weitere Aussagen sind nicht möglich.
Zum Vergleich und zur Übung sollen auch Standardabweichungen und Vertrauensbereich aus den früher (S. 69) angeführten Meßreihen mit 3 und mit 10 Einzelwerten berechnet werden. Es ergeben sich nach den angeführten Formeln:

Einzelwerte [in kΩ]	Mittel [in kΩ]	Standardabweichung [in kΩ]	Vertrauensbereich [in kΩ]
44 49 50	47,7	3,2	39,3 ... 55,7
44 49 50 45 46 47 45 49 43 44	46,2	2,4	44,5 ... 47,9

Man erkennt einerseits, daß sich mit wenigen Messungen geringe Möglichkeiten ergeben. Der Vertrauensbereich ist so weit, daß kaum begründete Schlüsse zu ziehen sind. Andererseits verengen sich die Grenzen des Vertrauensbereichs mit zunehmender Anzahl von Einzelwerten immer weniger. Es gibt also eine von der Streuung des Meßvorgangs abhängige Anzahl von Einzelmessungen, bei der der Wirkungsgrad der Messung optimal ist — bei tragbarem Zeitaufwand tritt eine verhältnismäßig kleine Unsicherheit auf. Diese empfehlenswerte Anzahl von Einzelmessungen liegt meist zwischen 5 und 20 Werten. Eine geringe Anzahl von Einzelwerten, die aus Präzisionsmessungen stammen, ist vorteilhafter als eine große

Anzahl ungenauer Zahlenwerte. Für einen Vorgang, dessen Standardabweichung man (z. B. aus früheren Messungen) kennt, läßt sich aus den Formeln umgekehrt auch die Anzahl der erforderlichen Einzelmessungen errechnen, um eine vorgegebene Unsicherheit nicht zu überschreiten.

Beispiel
Widerstände mit dem Nennwert R = 100 kΩ sind auszumessen. Erfahrungsgemäß ist s etwa gleich 4 kΩ. Zugelassen wird eine Unsicherheit des Schlusses von 2%. Wieviel Einzelexemplare sind mindestens auszumessen?
Zugelassen ist:

$$c_1 \cdot s = \frac{2}{100} \cdot 100\ \text{k}\Omega$$

$$c_1 \cdot s = 2\ \text{k}\Omega$$

$$c_1 = \frac{2\ \text{k}\Omega}{4\ \text{k}\Omega} = 0{,}50$$

(aus Tabelle 4) $n \approx 18$.

Den berechneten Vertrauensbereich kann man wie einen zufälligen Fehler behandeln und angeben. Ein Meßergebnis wird in der Regel aus dem Mittelwert, dem Vertrauensbereich und der Einheit bestehen. Für das Beispiel mit n = 5 kann das Meßergebnis in folgender Form angegeben werden:

$$R = (46{,}8 \pm 3{,}2)\ \text{k}\Omega$$

oder

$$R = 46{,}8\ \text{k}\Omega \pm 3{,}2\ \text{k}\Omega$$

oder

$$R = 43{,}6\ \text{k}\Omega \ldots 50{,}0\ \text{k}\Omega\,.$$

4.5. Der Bereich für die Lage der Einzelwerte

Eine andere, oft bedeutungsvolle Frage ist, innerhalb welcher Grenzen man die Einzelwerte der Gesamtheit erwarten darf. Diese Grenzen werden sicher weiter sein als die Grenzen für

die Lage des wahren Mittels. Neben einem Irrtumsrisiko (in diesem Fall 10%, d. h., nur 90% der Aussagen werden richtig sein), muß man noch die prozentuale Anzahl der Werte festlegen, die innerhalb der zu errechnenden Grenzen liegen sollen. In Tabelle 5 sind Grenzen für 90% und 95% aller Einzelwerte angegeben. Der Bereich B errechnet sich aus

$$B = x \pm c_2 \cdot s .$$

Tabelle 5 Werte für c_2

n		4	5	6	8	10	15
c_2	(90%)	4,2	3,5	3,1	2,7	2,5	2,3
c_2	(95%)	5,0	4,2	3,7	3,3	3,0	2,7
n		20	25	30	50		
c_2	(90%)	2,2	2,1	2,0	1,9		
c_2	(95%)	2,6	2,5	2,4	2,3		

Beispiel

Für unser wiederholt benutztes Beispiel mit n = 5 sind die Bereiche:

90% *aller* Einzelwerte werden zwischen

$(46,8 \pm 3,5 \cdot 2,6)$ kΩ = 37,7 kΩ ... 55,9 kΩ

liegen, 95% aller Einzelwerte zwischen

$(46,8 \pm 4,2 \cdot 2,6)$ kΩ = 35,9 kΩ ... 57,7 kΩ .

Derartige Untersuchungen haben nur bei verhältnismäßig großer Anzahl von Einzelwerten und bei kleiner Standardabweichung einen praktischen Sinn.

Wie zu erkennen ist, können die Einzelwerte bei wenigen Meßwerten weit auseinanderliegen. Man soll deshalb auch unwahrscheinlich erscheinende Werte, sogenannte Ausreißer, nicht einfach weglassen, soweit nicht Irrtümer beim Messen oder beim Ablesen begangen wurden. Auf keinen Fall ist es zulässig, sich z. B. von 10 Werten die 5 herauszusuchen, die „am besten zusammenliegen".

4.6. Vergleich von Mittelwerten

Ein dritter, wichtiger Fall soll noch besprochen werden. Man will beispielsweise feststellen, ob eine längere Alterung bei 50 °C den Widerstandswert merklich verändert. Vor der Alterung ergaben sich die 10 Meßwerte, die auf S. 69 genannt wurden, und nach der Alterung hat man die folgenden Werte (in kΩ) ermittelt:

46 48 45 47 49 48 49 44 48 50, Mittel: 47,4.

Die nach der Alterung festgestellten Werte ergaben sich bei Exemplaren, die wahllos aus der Gesamtheit herausgegriffen wurden, also *nicht* bei den Exemplaren, die man vor der Alterung ausgemessen hatte.

Die beiden Mittelwerte aus je 10 Messungen (46,2 kΩ und 47,4 kΩ) unterscheiden sich voneinander. Es wäre aber voreilig, daraus zu schließen, daß die Alterung den Widerstandswert erhöht habe. Der Unterschied könnte sich auch aus der natürlichen Streuung der Einzelwerte erklären. Um diese Frage zu entscheiden, errechnet man den Ausdruck

$$t_1 = \frac{|(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)|}{\sqrt{\frac{(n-1)(s_1^2 + s_2^2)}{2n-2}}} \sqrt{\frac{n}{2}}$$

(s_1 und s_2 – beide Standardabweichungen, n – gemeinsame Anzahl von Werten).

In diesem Fall sind $n = 10$, $\bar{x}_1 = 46{,}2$ kΩ (von S. 69), $\bar{x}_2 = 47{,}4$ kΩ, $s_1 = 2{,}4$ kΩ (von S. 75), $s_2 = 1{,}9$ kΩ (aus den obigen Werten). Die senkrechten Striche im Zähler des Bruches bedeuten, daß der absolute Betrag einzusetzen ist, also ohne Rücksicht auf das Vorzeichen des Ausdrucks $(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)$.

Aus den Werten ergibt sich:

$$t_1 = \frac{|(46{,}2 - 47{,}4)|}{\sqrt{\frac{9\,(2{,}4^2 + 1{,}9^2)}{18}}} \sqrt{5}$$

$$t_1 = \frac{1,2}{2,16} \cdot 2,24$$

$$t_1 = 1,25 .$$

Die erhaltene Größe t_1 wird nun mit der Größe t verglichen, die man für verschiedenes Urteilsrisiko aus Tabelle 6 ersehen kann. Ein begründeter Unterschied zwischen den beiden Mittelwerten besteht, wenn t_1 größer als t ist. Andernfalls läßt sich keine Entscheidung treffen.

Tabelle 6 Werte für t

n	Urteilsrisiko 10%	5%	1%
3	2,13	2,78	4,60
4	1,94	2,45	3,71
5	1,86	2,31	3,36
6	1,81	2,23	3,17
7	1,78	2,18	3,06
8	1,76	2,15	2,98
9	1,75	2,12	2,92
10	1,73	2,10	2,88
15	1,70	2,05	2,76
20	1,68	2,02	2,70
30	1,67	2,00	2,66

Für n = 10 ist t je nach dem zugelassenen Urteilsrisiko 1,73, 2,10 oder 2,88, in jedem Falle größer als t_1. Man kann deshalb selbst mit dem hohen Urteilsrisiko von 10% (also mit nur 90% Urteilssicherheit) *nicht* behaupten, daß sich beide Mittelwerte wesentlich unterscheiden. Darum läßt sich auch nichts über den Einfluß der Alterung aussagen. Das ist ein kaum erwartetes, sehr wesentliches Resultat, das vor unbegründeten Schlüssen über mögliche Zusammenhänge bewahrt. Um Einflüsse der Alterung nachzuweisen, muß man bedeutend mehr Exemplare ausmessen oder den Versuch mit einer Sorte wiederholen, deren Einzelwerte sich weniger voneinander unterscheiden.

In diesem Abschnitt konnte nur an wenigen Beispielen der Nutzen statistischer Rechnungen gezeigt werden. Nach ähnlichen Formeln lassen sich viele Fragen einwandfrei klären; z. B. die folgenden:

Unterscheiden sich zwei Standardabweichungen tatsächlich voneinander, d. h., hat ein Meß- oder Herstellungsverfahren geringere Abweichungen zur Folge als ein anderes?

Sind zwei Größen in stärkerem Maße voneinander abhängig als zwei andere?

Auf diese Probleme wird deshalb hingewiesen, weil es sinnlos ist, bei den Meßverfahren alle Sorgfalt anzuwenden (der „Kampf" um ±0,1%) und die Auswertung oberflächlich zu erledigen. Gerade bei Messungen, die höheren Forderungen genügen sollen, sind Fehlschlüsse bei der Bewertung der Zahlenwerte oft viel folgenschwerer (weil schwerer nachweisbar) als reine Meßfehler. Dem Meßtechniker, der Wert auf Glaubwürdigkeit legt, sei daher geraten, sich an Hand eines der erhältlichen Fachbücher (vgl. Literaturverzeichnis) ausführlich über die Zusammenhänge und Rechenverfahren der mathematischen Statistik zu informieren.

5. Die maschinelle Verwertung von Meßergebnissen

Es wurde schon erwähnt, daß in dieser Broschüre vor allem die Meßtechnik als Teil der BMSR-Technik behandelt wird; die Meßwerte sollen in der Regel nicht vom Menschen abgelesen, sondern direkt von technischen Einrichtungen verwertet werden. Um das Bild abzurunden, folgen einige Angaben über die Glieder zur Verwertung von Signalen, die von Meßfühlern geliefert werden. Das Gebiet der Steuer- und Regeltechnik wird in Band 75 dieser Reihe ausführlicher behandelt.

Die analogen oder diskreten Signale, die die Meßfühler liefern, werden in technischen Einrichtungen entweder zur Überwachung und Lenkung eines Vorgangs oder zur Registrierung des Ablaufs verwendet. Im ersten Fall greifen die Meßgrößen nach geeigneter Verstärkung und Umformung in den ablaufenden Prozeß ein, z. B. zur Kontrolle gegebener Grenzwerte oder zur Steuerung bzw. Regelung eines Vorgangs. Das Messen ist Voraussetzung jeder Regelung und vieler Steuerungen. Im zweiten Fall werden die Meßgrößen nicht unmittelbar genutzt, sondern dauerhaft gespeichert. Aus den Registrierungen läßt sich nachträglich auf die Größe der Meßwerte schließen.



Bild 46
Transportabler
Kurvenschreiber

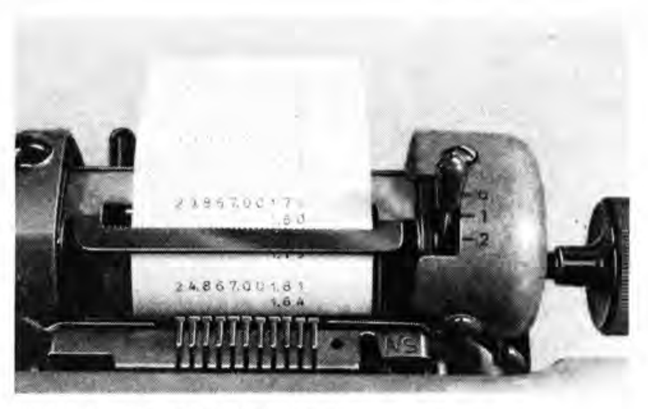


Bild 47 Aufzeichnung eines Digitaldruckers

Als einfache Registriereinrichtungen können schon elektromechanische Zähler angesehen werden. Außer zur reinen Stückzählung lassen sie sich unter anderem zur Bildung des zeitlichen Mittelwerts (durch Aufsummieren von Impulsen während einer gegebenen Zeit) verwenden. Die sogenannten Kurvenschreiber (Bild 46) zeichnen den zeitlichen Verlauf analoger Größen auf Diagrammpapier. Digitale Meßgeräte zur elektronischen Zählung, Kurzzeitmessung usw. haben „Informationsausgänge", an die Digitaldrucker (Bild 47) angeschlossen werden können. Damit lassen sich die Meßwerte sowie eine laufende Nummer oder Uhrzeit und Datum in Streifen- oder Blattform ziffernmäßig ausdrucken. Zu den Registrierverfahren kann man auch die fotografischen Verfahren (Bild 48) rechnen. Die Einzelbilder werden durch geeignete Zeitschalteinrichtungen periodisch ausgelöst. Solche fotografischen Registrierungen mit ohnehin vorhandenen Foto- oder Filmkameras sind sowohl für den Amateur von Bedeutung wie auch für manche technische Zwecke von Wert.

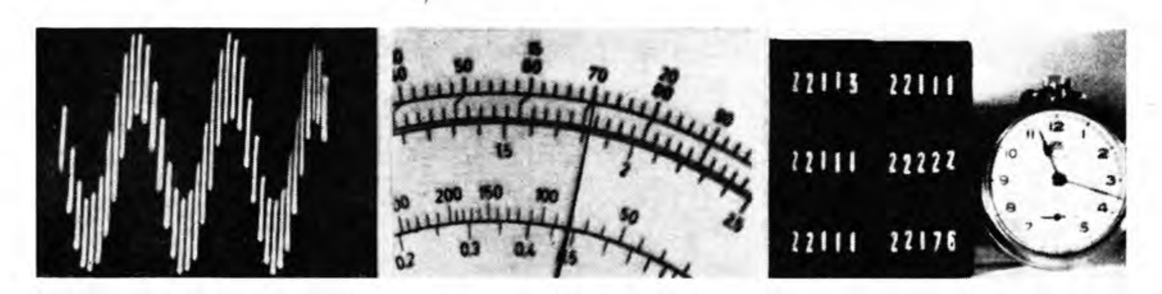


Bild 48 Fotografische Registrierung (Vergrößerung von 8-mm-Schmalfilmbildern)

6. Kleines Lexikon der Meßtechnik

Abgleichwiderstand	Abgleichbarer Drahtwiderstand, ergänzt den Leitungswiderstand zu Widerstandsthermometern oder Widerstandsferngebern auf $R_{ges} = 10\,\Omega$
Analog-Digital-Umsetzer (Wandler)	Gerät zur digitalen Messung stufenloser Größen
Analoge Messung	Nicht gestufte Mess[illegible] B. mit Zeigerinstrumenten
Ausgleichsleitung	Bei Temperaturmessung mit Thermoelementen: Leitermaterial mit gleichen thermoelektrischen Eigenschaften wie das zugehörige Thermoelement, jedoch mit anderer Zusammensetzung. Dient z. B. zur „Verlängerung" der Schenkel des Thermoelements bis zum Thermostaten
Dehnungsmeßstreifen	Fühler zur elektrischen Erfassung sehr kleiner Längenänderungen durch Widerstandsänderungen
Differentialtransformator	Bauteil zur induktiven Messung von Längenänderungen
Digitale Messung	Gestufte Messung mit Ziffernanzeige
Dimension	In Gleichungen u. ä.: übergeordnete Bezeichnung für Größenarten, z. B. Länge, Masse oder Zeit. Nicht mit Einheiten zu verwechseln

Fehler	Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert. Der relative Fehler wird auf den Soll-Wert bezogen
Fernsender	Irreführende Bezeichnung für Potentiometergeber, z. B. zu Manometern
Fotodiode	Durch Infrarotstrahlung steuerbare, in Sperrichtung betriebene Diode. Auch als Fotoelement verwendbar
Fotowiderstand	Durch Licht oder Strahlung steuerbarer, ungepolter Widerstand, oft aus Kadmiumsulfid
Gaschromatografie	Meßverfahren zur Art- und Mengenbestimmung von Gas- und Dampfgemischen
Hall-Generator	(Nach *E. H. Hall*) Fühler zur Messung von Größen des magnetischen Feldes; formt die magnetische Feldstärke in eine Spannungsdifferenz um. Auch zur Multiplikation zweier elektrischer Größen verwendbar
Heißleiter	Vgl. Thermistor
Herwid-Widerstand	Ältere Bezeichnung für Thermistoren (Herwid T) und Varistoren (Herwid S) des VEB *Keramische Werke* Hermsdorf
Hygrometer	Meßeinrichtung zur Erfassung des Feuchtigkeitsgehalts in Gasen
Hysterese	Erscheinung, daß eine Abhängigkeit nicht eindeutig ist, sondern sich beim Anwachsen der unabhängig Veränderlichen anders als beim Abnehmen der unabhängig

	Veränderlichen verhält, z. B. Schalthysterese von Relais, Hysterese in Magnetisierungskurven
Isotopenmeßtechnik	Meßverfahren mit (meist) künstlich radioaktiven Isotopen, u. a. zur Dickenmessung
Kalorimetrie	Meßverfahren zur Heizwertbestimmung brennbarer Gase
Kolorimetrie	Meßverfahren zur Festlegung der Zusammensetzung von Stoffen (meist von Flüssigkeiten) aus ihrer Farbe
Kraftmeßdose	Allgemeine Bezeichnung für Meßumformer oder Meßwertaufnehmer, vor allem für große Kräfte und Drücke; u. a. mit Dehnungsmeßstreifen oder piezoelektrischen Gebern
Lichtelektrische Empfänger	Sammelbezeichnung für optisch-elektrische Wandler (Fotowiderstand, -diode, -transistor, -zelle, -element und Sekundärelektronenvervielfacher)
Magnetoelastische Geber	Meßfühler zur Kraftmessung; sie beruhen auf der Abhängigkeit der Permeabilität von der mechanischen Beanspruchung
Meßblende	Teil einer Durchflußmeßeinrichtung, besonders für Gase und Dämpfe
Meßstellenwähler	Meist handbetätigte Umschalteinrichtung, mit der wahlweise mehrere Meßfühler mit einem Anzeige-, Registrier- oder Regelgerät verbunden werden können

NTC-Widerstand	Vgl. Thermistor
p_H-Wert-Messung	Messung des Säure- oder Basengehalts (Zusammensetzung oder Konzentration von Flüssigkeiten)
Piezoelektrische Messung	Meßverfahren zur elektrischen Messung vor allem dynamischer Beanspruchungen, z. B. zur Druck- und Wegmessung. Beruht auf der Ladungstrennung in mechanisch beanspruchten Kristallen
Preßduktor	Vgl. magnetoelastische Geber
Prüfen	Übergeordneter Begriff für maßliche Kontrollen (Messen und Lehren) und nichtmaßliche Kontrollen (Sichtprüfungen usw.)
Psychrometer	Gerät zur Feuchtemessung von Gasen, oft aus zwei Thermometern bestehend
Pyrometer	Gerät zur berührungslosen Temperaturmessung
Radartechnik	Funkmeßtechnik zum Feststellen von Körpern (Flugzeugen, Schiffen usw.) auf größere Entfernungen
Registriergeräte	Geräte zum dauerhaften Festhalten von Meßwerten, z. B. Zähler, Kurvenschreiber und Digitaldrukker
Ringwaage	Keine Waage, sondern Gerät zur Bestimmung des Durchflusses von Gasen
Rückwirkung	Beeinflussung von Meß-, Steuer- oder Regelgliedern durch nachgeschaltete Glieder, also entgegen der Signalflußrichtung. Durch die

	Rückwirkung des Meßfühlers auf den Vorgang können bedeutende Meßfehler entstehen
Schreiber	Vgl. Registriergeräte
Schwebekörper-Durchflußmesser	Gerät zur Messung der Durchflußmenge von Flüssigkeiten und Gasen
Schwellenwert (Ansprechwert)	Unterer Grenzwert eines Verfahrens oder eines Geräts, absolute untere Grenze für Messungen mit gegebenen Mitteln
Segerkegel	Keramischer, kegelförmiger Körper zur überschläglichen Grenzwertkontrolle hoher Temperaturen
Streuung	Mehrdeutiger Ausdruck. Wird für s (*Gaußsche Standardabweichung*) und auch für s^2 (Varianz) verwendet
Stromwaage	Spezieller Transmitter, formt geringe Strom- oder Spannungsänderungen (z. B. 0 bis 50 mV) in pneumatische Änderungen (z. B. 0,2 bis 1 kp/cm²) um
Temperaturmeßfarben	Farbstoffe, die bei festliegenden Temperaturen stark ihr Aussehen verändern. Werden für einige Überwachungszwecke angewendet
Thermistor	Halbleiter-Temperaturmeßfühler mit negativem Temperaturkoeffizienten
Thermoelement	Temperaturmeßfühler aus verschiedenen Metallen
Transmitter	(Umformer), Gerät, das unterschiedliche Größenarten, z. B

	Drücke, Kräfte oder Spannungen, in einheitliche, oft elektrische Änderungen (z. B. Stromstärkeänderungen zwischen 0 und 5 mA) umsetzt
Ultraschallmessung	Meßverfahren zur Feststellung von Fehlern in festen Körpern. Meist durch Katodenstrahloszillografen sichtbar gemacht
Umkehrspanne	Differenz der Anzeige eines Meßgeräts bei langsamer Veränderung der Meßgröße von größeren und von kleineren Werten her auf den gleichen Wert. Wird u. a. durch Lagerreibung hervorgerufen
Varistor (VDR-Widerstand)	Spannungsabhängiger Halbleiterwiderstand
Wandler	Allgemeine Bezeichnung für Bauglieder, deren Ein- und Ausgangssignal sich (z. B. durch die Dimension) unterscheiden. Spezielle Wandler sind Verstärker, Umformer (für analoge Größen) und Umsetzer (für digitale Größen)
Zenerdioden	(Fälschlich nach dem amerikanischen Physiker *Zener* genannte) Diode auf Si-Basis mit ausgeprägtem Durchbruchseffekt in Sperrrichtung, für viele Stabilisierungszwecke und zur Erzeugung nichtlinearer Skalenverläufe verwendbar

7. Verzeichnis von Formelzeichen

In Klammern aufgeführte Formelzeichen werden seltener benutzt

A (F)	Fläche
A (W)	Arbeit
b	Breite
B	Blindleitwert (Suszeptanz)
B	magnetische Induktion
C	Kapazität
d	Durchmesser, Abstand
D	Durchgriff von Röhren
DK	Dielektrizitätskonstante
E	elektrische Feldstärke
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
F (P)	Kraft
F	Rauschfaktor
G	(Wirk-)Leitwert
h	Höhe
h_{21e}	Stromverstärkung von Transistoren in Emitterschaltung
H	magnetische Feldstärke
i	zeitlich veränderliche Stromstärke
I	Stromstärke, I_K: Kurzschlußstrom, I_{ceo}: Kollektorreststrom von Transistoren
k	Klirrfaktor
l	Länge, l_m: mittlere Länge
L	Induktivität
m	Masse
M	Gegeninduktivität
n	Drehzahl, Anzahl
p_H	(auch pH) Maß für Wasserstoffionenkonzentration, d. h. auch für die Leitfähigkeit und Zusammensetzung von Flüssigkeiten (p_H-Wert)

P	(N)	Leistung, P_N: Nennleistung, P_v: Verlustleistung
q		Querschnittsfläche
Q		Elektrizitätsmenge, Ladung, Gütefaktor
Q		Wärmemenge
r		Radius
R		(Wirk-)Widerstand, R_L: Ohmscher Widerstand einer Spule, R_a: Außenwiderstand, R_i: Innenwiderstand
s		Weg, Wanddicke
s		Standardabweichung
S		Steilheit der Kennlinie (von Röhren)
t		Temperatur
T	(t)	Zeit, Periodendauer
u		zeitlich veränderliche Spannung
U	(E)	elektrische Spannung, elektromotorische Kraft
ü		Übersetzungsverhältnis (von Transformatoren)
v		Geschwindigkeit
V		Volumen
w	(W)	Windungszahl
W	(E)	Energie
X		Blindwiderstand, X_c: kapazitiver Blindwiderstand
Y		Scheinleitwert (Admittanz)
Y		Steilheit der Kennlinie (von Halbleitern)
Z		Scheinwiderstand (Impedanz)
β	(Beta)	(Strom-) Verstärkung
γ	(Gamma)	Dichte (früher: spezifisches Gewicht)
δ	(Delta)	Verlustwinkel, $\tan \delta$: Verlustfaktor
ε	(Epsilon)	Dielektrizitätskonstante, ε_0: absolute Dielektrizitätskonstante (des Vakuums), ε_r: relative Dielektrizitätskonstante
η	(Eta)	Wirkungsgrad
ϑ	(Theta)	Temperatur
Θ	(Theta)	elektrische Durchflutung
$\varkappa$	(Kappa)	elektrische Leitfähigkeit
λ	(Lambda)	Wellenlänge
μ	(My)	Permeabilität, μ_0: absolute Permeabilität (des Vakuums), μ_r: relative Permeabilität

μ	(My)	Leerlaufverstärkung
ν	(Ny)	Frequenz
ϱ	(Rho)	spezifischer elektrischer Widerstand, auch Dichte
ϱ_L	(Rho)	Spulengüte oder Gütefaktor
σ	(Sigma)	mechanische Spannung
τ	(Tau)	Zeitkonstante ($\tau = R \cdot C$)
φ	(Phi)	Phasenwinkel, cos φ: Leistungsfaktor
Φ	(Phi)	magnetischer Fluß
ω	(Omega)	Kreisfrequenz ($= 2\,\pi f$)

8. Verzeichnis von Maßeinheiten

Veraltete, nicht mehr zulässige Maßeinheiten sind *kursiv* gedruckt

A	Ampere, Grundeinheit der Stromstärke
AE	Angström-Einheit, Längeneinheit; 1 AE = 10^{-10} m
at	Atmosphäre, Druckeinheit; 1 at = 1 kp/cm² *(veraltet ist atü)*
Aw	*Amperewindung, veraltete Einheit der magnetischen Spannung*
B (b)	Bel (meist in der Form dB oder db = Dezibel), logarithmisches Maß für Verstärkung, Schallpegel usw. (1 dB = 1 phon)
bar	Druckeinheit, besonders in der Meteorologie
C	Coulomb, Einheit der Ladung; 1 C = 1 As
c	(z. B. 1^c) Zentigon, Winkeleinheit; $^1/_{100}$ des Gon (Neugrads)
cal	Kalorie, Einheit der Energie (meist für Wärmemengen)
d	Tag (lat. dies), Zeiteinheit
dyn	Krafteinheit; 1 dyn = 10^{-5} N
erg	Einheit der Energie; 1 erg = 10^{-7} J
eV	Elektronenvolt, Einheit der Energie
F	Farad, Einheit der Kapazität
g	Gramm, $^1/_{1000}$ der Masseeinheit
g	(z. B. 1^g) Gon (Neugrad), Winkeleinheit; $100^g = 90°$
G	*Gauß, veraltete Einheit der magnetischen Induktion*
grd	Grad, Einheit bei der Angabe von Temperaturdifferenzen
h	Stunde (lat. hora), Zeiteinheit
H	Henry, Einheit der Induktivität
HK	*Hefnerkerze, veraltete Einheit der Lichtstärke*
Hz	Hertz, Einheit der Frequenz

J	Joule, Einheit der Energie; 1 J = 1 Ws = 1 Nm
l	Liter, Volumeneinheit; 1 l ist rund 1 dm^3
lx	Lux, Einheit der Beleuchtungsstärke
m	Meter, Grundeinheit der Länge
M	*Maxwell, veraltete Einheit des magnetischen Flusses*
μ	*(my), veraltetes Längenmaß,* heute: μm (Mikrometer)
mμ	*(millimy), veraltetes Längenmaß,* heute: nm (Nanometer)
min	Minute, Zeiteinheit
mm WS	Millimeter Wassersäule, Druckeinheit; 1 mm WS = 10^{-4} at
mm Hg	*Millimeter Quecksilbersäule, veraltete Druckeinheit,* heute: Torr
N	Newton, Krafteinheit, 1 N = 1 mkg/s^2
Nm³	*Normkubikmeter, veraltete Bezeichnung für Gasvolumina*
Np	*(manchmal auch N)* Neper, logarithmisches Maß der Dämpfung
Ω	Ohm, Einheit des elektrischen Widerstands
Oe	*Oerstedt, veraltete Einheit der Feldstärke*
p	Pond, Einheit der Kraft
ppm	(auch ppM) Konzentrationsangabe, vor allem für Gase; 1 ppm ist 1 (Volum-) Teil in 10^6 Teilen Luft
P	Poise (meist in der Form cP = Zentipoise), Einheit der dynamischen Viskosität
PS	Pferdestärke, veraltete Einheit der Leistung, z. Z. noch zulässig
rad	Radiant, Einheit des Winkels im Bogenmaß
s	Sekunde (nicht: sek oder sec!), Grundeinheit der Zeit
S	Siemens, Einheit des Leitwerts (Kehrwert des Widerstands)
sr	Steradiant, Einheit des räumlichen Winkels
t	Tonne, Masseeinheit; 1 t = 1000 kg
T	Tesla, Einheit der magnetischen Induktion

Torr	Druckeinheit, vor allem in der Meteorologie
U/min	Umdrehungen je Minute, 1 U/min = $^{1}/_{60}$ Hz
V	Volt, Einheit der Spannung
VA	Voltampere, Einheit der elektrischen Scheinleistung
var	(Voltampere reaktiv) Einheit der elektrischen Blindleistung
W	Watt, Einheit der Leistung
Wb	Weber, Einheit des magnetischen Flusses; 1 Wb = 1 Vs
°	(z. B. 1°) Grad, Winkeleinheit
°C	Grad Celsius, Temperatureinheit; 0 °C = 273,15 °K
°E	*Grad Engler, veraltete Einheit der Viskosität*
°K	Grad Kelvin, Temperatureinheit
′	(z. B. 1′) Minute, Winkeleinheit; 60′ = 1°
″	(z. B. 1″) Sekunde, Winkeleinheit; 60″ = 1′
″	Zoll, englisches Längenmaß; noch für Rohrgewinde u. ä.
γ	*(Gamma) veraltete Masseneinheit,* heute: μg (Mikrogramm)

9. Literaturhinweise

W. Curth, *Betriebsmeß- und Regelungstechnik*, Bd. I, VEB Verlag Technik, Berlin 1965

J. Czech, *Oszillografen-Meßtechnik*, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin 1965

H. Förster, *Die gesetzlichen Einheiten und ihre praktische Anwendung*, VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1961

H. F. Grave, *Elektrische Messung nichtelektrischer Größen*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1965

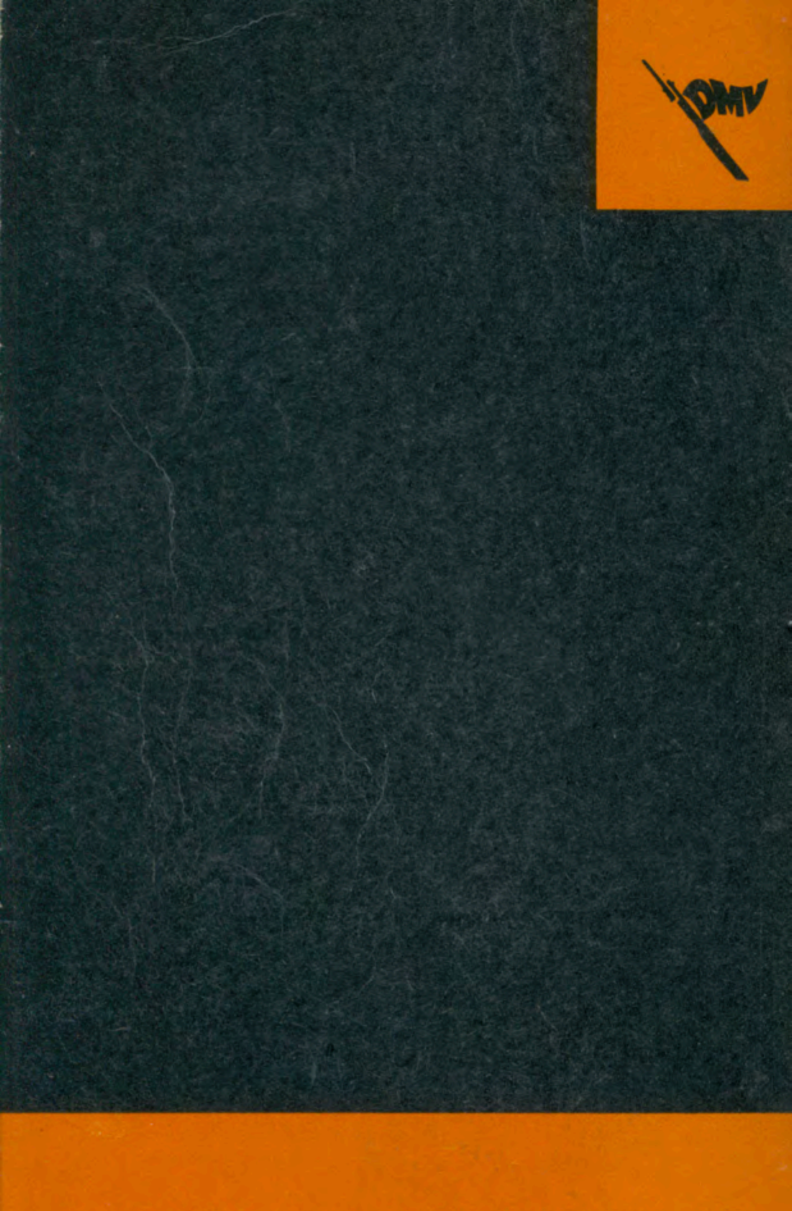
F. Kohlrausch, *Praktische Physik*, 2 Bände, 21. Aufl., B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1960/62

G. K. Netschajew u. a., *Relais und Geber mit Halbleiter-Thermowiderständen*, VEB Verlag Technik, Berlin 1965

W. W. Passynkow u. a., *Nichtlineare Halbleiterwiderstände*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1965

R. Storm, *Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle*, VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1967

Reihe *Automatisierungstechnik*, VEB Verlag Technik, Berlin, u. a. Heft 13, 17, 24, 27, 32, 34, 41 und 53



DEUTSCHER MILITÄRVERLAG